



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# SNÍŽENÍ NÁKLADŮ NA VÝROBU ODLITKŮ ZE SLITIN HLINÍKU

COSTS REDUCTION IN PRODUCTION OF AL-ALLOY CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. LUCIE NOVÁKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROMÍR ROUČKA, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/2010

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Lucie Nováková

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Snížení nákladů na výrobu odlitků ze slitin hliníku**

v anglickém jazyce:

### **Costs reduction in production of Al-alloy castings**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Identifikace rozhodujících typů vnitřních vad u vybraných položek ze slitin hliníku litých do pískových forem. Analýza pravděpodobných příčin vad a návrh na opatření vedoucích ke snížení jejich výskytu a ke snížení výrobních nákladů. Optimalizace technologií s ohledem na výrobní náklady při odlévání do pískových forem.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je identifikace rozhodujících druhů vad na vybraných položkách odlitků, vyráběných ve Slévárně a modelárně Nové Ransko, s.r.o. Předpokládá se provedení analýzy příčin vzniku vad a návrh opatření ke snížení jejich výskytu. Na základě této analýzy a s přihlédnutím na výrobní náklady provést optimalizaci technologie.

Snížení rozsahu oprav a množství neshodných odlitků ze slitin hliníku v podniku Slévárna a modelárna Nové Ransko, s.r.o.

Seznam odborné literatury:

1. ROUČKA, J. Metalurgie neželezných slitin. Skripta VUT. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
2. MICHNA, S., aj. Encyklopedie hliníku, 1. vyd. Děčín: ALCAN, 2005. 699 s. ISBN 80-89041-88-4.
3. GRUZLESKI, JE. Microstructure development during metalcasting. 1st ed. Des Plaines: AFS, 1990. 238 p. ISBN 0-87433-204-4.
4. GRUZLESKI, JE. The Treatment of Liquid Aluminium-Silican Alloys, 1st ed. Des Plaines: AFS, 1999. 250 p. ISBN 0-87433-121-8.
5. DAVIS, GJ. Solidification and Casting. 1st ed. London: Galliard, 1973. 200 p. ISBN 0-85334-556-2.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty



## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá řešením nejzávažnějších vnitřních vad odlitků ze slitin hliníku litých do pískových forem ve společnosti Slévárna a modelárna Nové Ransko, s.r.o. Řešení problematiky obsahuje popis problémových odlitků s šetřením struktury a fází a následný detailní rozbor jejich výroby. V práci je zkoumán vliv Fe a Mn na možný vznik vnitřní poretity provedením zkušebních taveb se zhodnocením změny vnitřní struktury. Řešením je přísnější kontrola chemického složení taveniny s ohledem na poměr Mn/Fe přítomných ve slitině, nákup odplynovacího zařízení ke snížení naplynění taveniny a také zdokonalení kontroly naplynění taveniny nákupem vhodného zařízení pro stanovení indexu hustoty.

### Klíčová slova

Slitiny hliníku, vnitřní vady, poretita, lití do písku, písková forma, metalografie, struktura kovu, FDU, Dichte index, AlSi10Mg, AlSi7Mg0,3,  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze,  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ ) fáze.

## ABSTRACT

This thesis deals with solving the most serious internal defects in castings made of aluminum alloys which are cast in sand molds in Slévárna a modelárna Nové Ransko Ltd. The problem solving contains a description of the problematic castings with the investigation of the structure and phases and subsequent detailed analysis of their production. The Author of this thesis also examines the influence of Fe and Mn on a possible formation of the internal porosity with the help of test meltings with the evaluation of the internal structural change. The Author's design solution is a close checking of chemical composition with regard to the ratio Mn / Fe present in the alloy, the purchase of Foundry Degassing Unit to reduce gassiness of melted metals and better control of gassiness with the help of the appropriate equipment for the density Dichte index.

### Key words

Al - alloys, internal defect, shrinkage porosity, sand casting, sand mould, metallography, metal structure, FDU, Dichte index, AlSi10Mg, AlSi7Mg0,3, phase  $\beta(\text{Al}_5\text{FeSi})$ , phase  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ ).

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVÁKOVÁ, L. *Snížení nákladů na výrobu odlitků ze slitin hliníku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 93 s, 5 příloh. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Snížení nákladů na výrobu odlitků ze slitin hliníku vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

27. 5. 2010

.....  
Lucie Nováková



## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jaromírovi Roučkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Speciální poděkování patří společnosti Slévárna a modelárna Nové Ransko, s.r.o., za poskytnuté informace, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout. Nemalé poděkování patří také celému kolektivu, který mi umožnil a zároveň se podílel na praktické realizaci experimentů v provozu slévárny společnosti.

Významné poděkování patří i celé mé rodině za podporu a trpělivost během celého mého studia.



## OBSAH

<b>ABSTRAKT .....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>4</b>
<b>BIBLIOGRAFICKÁ CITACE .....</b>	<b>4</b>
<b>PROHLÁŠENÍ .....</b>	<b>5</b>
<b>PODĚKOVÁNÍ .....</b>	<b>6</b>
<b>OBSAH .....</b>	<b>7</b>
<b>CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
Úvod do problému ve společnosti Slévárna a modelárna Nové Ransko, s.r.o. ....	11
<b>1 POPIS ODLITKŮ VYBRANÝCH K ŠETŘENÍ .....</b>	<b>12</b>
1.1 Odlitek číslo 1 .....	13
1.2 Odlitek číslo 2 .....	14
1.3 Odlitek číslo 3 .....	15
1.4 Odlitek číslo 4 .....	16
1.5 Odlitek číslo 5 .....	17
1.6 Odlitek číslo 6 .....	18
<b>2 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU .....</b>	<b>19</b>
2.1 Slitiny odlitků č. 1 – 6 .....	19
2.1.1 Slitiny Al – Si – Mg .....	19
2.1.2 Slitiny AlSi7Mg0,3 a AlSi10Mg a jejich vlastnosti: .....	20
<b>3 METALOGRAFICKÉ VYHODNOCENÍ VZORKŮ .....</b>	<b>21</b>
3.1 Teorie metalografie .....	21
3.2 Příprava vzorků .....	21
3.3 Snímky pořízené stereoskopickým mikroskopem .....	22
3.4 Zobrazení mikro a makro struktury odlitků .....	22
3.4.1 Vzorek č. 1 .....	22
3.4.2 Vzorek č. 2 .....	23
3.4.3 Vzorek č. 3 .....	24
3.4.4 Vzorek č. 4 .....	25
3.4.5 Vzorek č. 5 .....	26
3.4.6 Vzorek č. 6 .....	27
3.5 Vyhodnocení vzorků .....	27
<b>4 ANALÝZA VZORKŮ ELEKTRONOVÝM RASTROVACÍM MIKROSKOPEM .....</b>	<b>28</b>
4.1 Princip rastrovacího elektronového mikroskopu .....	28
4.2 Analyzované vzorky .....	30
4.2.1 Vzorek č. 3 .....	30
4.2.2 Vzorek č. 4 .....	31
4.2.3 Vzorek č. 6 .....	34
4.3 Shrnutí provedené analýzy .....	36
<b>5 VNITŘNÍ VADY VYSKYTUJÍCÍ SE V ODLITCÍCH .....</b>	<b>37</b>
5.1 Stručný popis nejčastěji se vyskytujících vad .....	37
5.1.1 Pórovitost .....	37
5.1.2 Fáze $\beta$ (Al <sub>5</sub> FeSi) .....	37
5.1.3 Přemodifikovaná struktura .....	38



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

<b>6</b>	<b>ROZBOR VÝROBY JEDNOTLIVÝCH ODLITKŮ</b>	<b>39</b>
6.1	Formovací směs	39
6.1.1	Příprava a doprava formovací směsi	39
6.2	Technologie výroby forem	40
6.2.1	Strojní formování	40
6.2.2	Ruční formování	40
6.3	Technologie výroby jader	41
6.3.1	Jaderna pro slévárnu neželezných kovů	41
6.4	Příprava a úprava taveniny	42
6.4.1	Tavírna	42
6.4.2	Tavení	42
6.4.3	Ošetřování taveniny	43
6.4.4	Transport taveniny	45
6.5	Vytlačování a čištění odlitků	45
6.6	Kontroly procesů používané ve společnosti	46
6.6.1	Zkoušení formovacích směsí	46
6.6.2	Kontrola taveniny	50
6.7	Návrh doporučení ke zlepšení kvality taveniny během výrobního procesu	54
<b>7</b>	<b>VLIV FE A Mn NA POREZITU U Al - Si SLITIN</b>	<b>55</b>
7.1	Možné zdroje Fe v tavenině	56
7.2	Tvorba intermetalických fází	56
7.3	Vliv Fe na porezitu	57
7.4	Vliv Mn na porezitu	59
<b>8</b>	<b>PROVEDENÝ EXPERIMENT VLIVU Fe A Mn NA STRUKTURU</b>	<b>60</b>
8.1	Slitina AlSi8Cu3 (A, B, C)	62
8.1.1	Tavba A	62
8.1.2	Tavba B	62
8.1.3	Tavba C	63
8.2	Shrnutí taveb A, B, C	63
8.3	Vyhodnocení metalografické struktury tavby A, B, C	65
8.3.1	Vzorek A	65
8.3.2	Vzorek B	66
8.3.3	Vzorek C	66
8.4	Slitina AlSi10Mg (D, E)	67
8.4.1	Tavba D	67
8.4.2	Tavba E	67
8.5	Shrnutí taveb D, E	68
8.6	Vyhodnocení metalografické struktury tavby D, E	70
8.6.1	Vzorek D	70
8.6.1	Vzorek E	71
8.7	Slitina AlSi10Mg (F, G, H, I)	72
8.7.1	Tavba F	72
8.7.2	Tavba G	72
8.7.3	Tavba H	73
8.7.1	Tavba I	73
8.8	Vyhodnocení Tavby F, G, H, (I)	74
8.9	Vyhodnocení metalografické struktury tavby F, G, H	76
8.9.1	Vzorek F	76
8.9.2	Vzorek G	76
8.9.3	Vzorek G	76
8.9.4	Vzorek H	77





## DIPLOMOVÁ PRÁCE

8.10	Shrnutí kapitoly 8 .....	78
8.10.1	Tavby A, B, C .....	78
8.10.2	Tavby D, E.....	78
8.10.3	Tavby F, G, H .....	78
<b>9</b>	<b>REALIZACE DOPORUČENÝCH OPATŘENÍ VE SPOLEČNOSTI .....</b>	<b>79</b>
9.1	Nákup zařízení pro měření indexu hustoty .....	79
9.1.1	Výpočet návratnosti investice.....	79
9.2	Situace po realizaci zařízení 3-VT-LC + MK2200-LC .....	82
9.3	Nákup zařízení FDU pro odplynění a úpravu taveniny.....	83
9.3.1	Popis produktu.....	83
9.3.2	Výpočet návratnosti investice.....	84
9.4	Situace po realizaci zařízení FDU Mark 10 2 x MTS 1500.....	87
<b>10</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>88</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY .....</b>	<b>89</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>91</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>93</b>



## CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je prošetření nejzávažnějších vnitřních vad odlitků ze slitin hliníku litých do pískových forem s návrhem opatření k jejich zabránění ve společnosti Slévárna a modelárna Nové Ransko, s.r.o.

Řešení problematiky úkolu bude obsahovat:

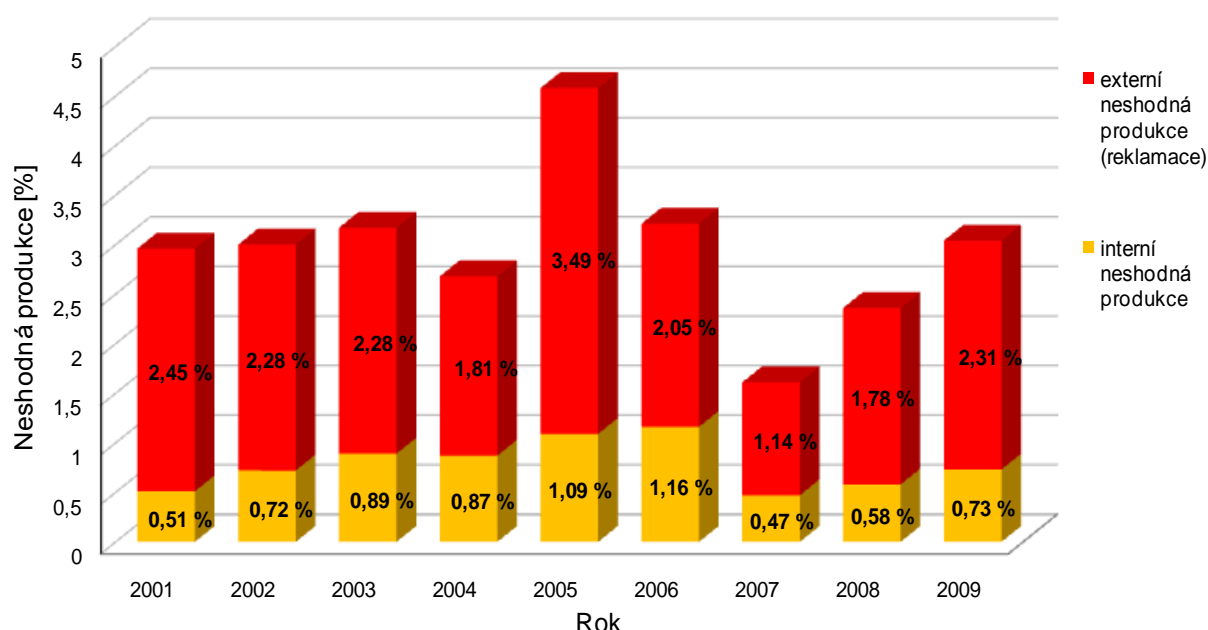
- popis problémových odlitků ve společnosti
- metalografické vyhodnocení odebraných vzorků
- analýzu vzorků rastrovacím elektronovým mikroskopem
- identifikaci rozhodujících druhů vnitřních vad
- detailní rozbor výroby vybraných odlitků ve společnosti
- analýzu postupu výroby a pravděpodobných příčin vnitřních vad
- návrhy na opatření vedoucí ke snížení výskytu rozhodujících druhů vnitřních vad
- ekonomické zhodnocení nápravných opatření – výpočet návratnosti investice

## ÚVOD

Vady odlitků a jejich řešení jsou velkým problémem téměř ve všech slévárnách. Základním předpokladem k získání kvalitního odlitku podle požadavků a specifik zákazníka je snaha vyhnout se vzniku vad, a pokud již vady vzniknout umět je správně identifikovat a nalézt vhodné řešení k jejich odstranění. Přičemž identifikace vad je největším problémem ve většině sléváren. T. Elbel [1] v jednom ze svých článků napsal: „Diagnostikovat vady je klíčem ke snížení nákladů ve slévárně“. Je známo, že moderní přístup k zajištění výroby jakosti odlitků spočívá v prevenci – v předcházení vadám – a plánování jakosti. Vady by tedy neměly být následně vyhledávány, ale pokud již k tomu dojde, měli by být známy racionální postupy identifikace vad odlitků a stanovení příčin jejich vzniku. [1]

### Úvod do problému ve společnosti Slévárna a modelárna Nové Ransko, s.r.o.

V posledních letech vzrůstají ve společnosti Slévárna a modelárna Nové Ransko, s.r.o. (dále jen společnost) požadavky na velmi vysokou vnitřní kvalitu, a to nejen na odlitky z LLG a LKG, ale především na odlitky z Al a Cu slitin zejména pro zahraniční odběratele, kteří mají přísnější požadavky na vnitřní kvalitu, než připouští ČSN. V graf 1 je znázorněn průběh interní a externí neshodné produkce ve společnosti v posledních devíti letech, přičemž lze pozorovat, že v posledních třech letech reklamace ze stran zákazníků narůstají, což je hlavním impulsem k nutnosti nalézt vhodná řešení ke snížení neshodné produkce, protože s každou podanou reklamací výrazně vzrůstají náklady společnosti. Provedenou analýzou bylo zjištěno, že největší problémy s vnitřní kvalitou odlitků jsou se vznikající porezitou a dalšími nehomogenitami metalografické struktury kovu. Z uvedených důvodů je slévárna nucena investičně řešit vhodnější metalurgické úpravy taveniny tak, aby hodnoty Dichte indexu podle požadavků zákazníka klesly pod 2 %. Tento požadavek společnost zajišťuje nákupem nového zařízení pro stanovování indexu hustoty a realizací investice do zařízení FDU s možností vnášení modifikačních a očkovacích granulí.



Graf 1 Vývoj neshodné produkce na pracovišti neželezných kovů ve společnosti od roku 2001



## 1 POPIS ODLITKŮ VYBRANÝCH K ŠETŘENÍ

V této kapitole jsou přehledně uvedeny základní vlastnosti vybraných odlitků, které byly vyčteny z technologických karet společnosti. Podrobný popis a rozbor jednotlivých etap výroby jsou uvedeny v kapitole č. 6. Na fotografiích (obr. 1.1, obr. 1.3, obr. 1.5, obr. 1.7, obr. 1.9 a obr. 1.11) jsou vyznačena místa odběru vzorků a ploch pro další zkoumání (viz kapitola č. 3 a 4).

Všechny tyto odlitky se používají pro čerpací techniku, proto jsou na ně kladeny vysoké nároky na tlakotěsnost. Zákazníkem bylo zjištěno, že tuto vlastnost nesplňují, proto jsou podrobeny zkoumání v této diplomové práci, aby mohla být navržena vhodná nápravná opatření.

## 1.1 Odlitek číslo 1



Obr. 1.1 Fotografie odlitku číslo 1

Tab. 1.1 Základní popis odlitku č. 1

číslo odlitku		1
materiál odlitku		AlSi10Mg (424331)
hrubá hmotnost odlitku [kg]		6,7
označení odlitku		AH 2242
formování		ruční
počet jader		1
jádro		Ručně formované – akrylát + CO <sub>2</sub>
rozměry formovacího rámu [mm]	horní	850x850x200
	spodní	850x850x200
hmotnost tekutého kovu [kg]		12,2
lící teplota [°C]		720
tepelné zpracování		-

Tab. 1.2 Chemické složení odlitku č. 1

Prvek	Al	Si	Mn	Mg	Cu	Fe	Ni	Ti	Zn	Ca
Hm. %	84,50	9,76	0,07	0,33	0,024	0,393	0,014	0,081	0,016	0,003

Modelové zařízení viz obr. 1.2 ukazuje umístění dvou odlitků v jedné formě.



Obr. 1.2 Modelové zařízení pro výrobu odlitků č. 1

## 1.2 Odlitek číslo 2



Obr. 1.3 Fotografie odlitku číslo 2

Tab. 1.3 Základní popis odlitku č.2

číslo odlitku		2
materiál odlitku		AlSi10Mg (424331)
hrubá hmotnost odlitku [kg]		4,8
označení odlitku		AH 3113
formování		ruční
počet jader		1
jádro		vstřelované – akrylát +CO <sub>2</sub>
rozměry formovacího rámu [mm]	horní	850x850x200
	spodní	850x850x200
hmotnost tekutého kovu [kg]		8,7
lící teplota [°C]		720
tepelné zpracování		-

Tab. 1.4 Chemické složení odlitku č. 2

Prvek	Al	Si	Mn	Mg	Cu	Fe	Ni	Ti	Zn	Ca
Hm. %	86,09	10,43	0,15	0,22	0,026	0,481	0,016	0,093	0,008	0,002

Modelové zařízení viz obr. 1.4 ukazuje umístění čtyř odlitků v jedné formě.



Obr. 1.4 Modelové zařízení pro výrobu odlitků č. 2

### 1.3 Odlitek číslo 3



Obr. 1.5 Fotografie odlitku číslo 3

Tab. 1.5 Základní popis odlitku č. 3

číslo odlitku		3
materiál odlitku		AlSi10Mg (424331)
hrubá hmotnost odlitku [kg]		3,6
označení odlitku		AH 2709
formování		strojní
počet jader		3
jádro 1		1 x vstřelované
jádro 2, 3		2 x COLD- BOX
rozměry formovacího rámu [mm]	horní	450x350x180
	spodní	450x350x120
hmotnost tekutého kovu [kg]		6,6
lící teplota [°C]		720
tepelné zpracování		-

Tab. 1.6 Chemické složení odlitku č. 3

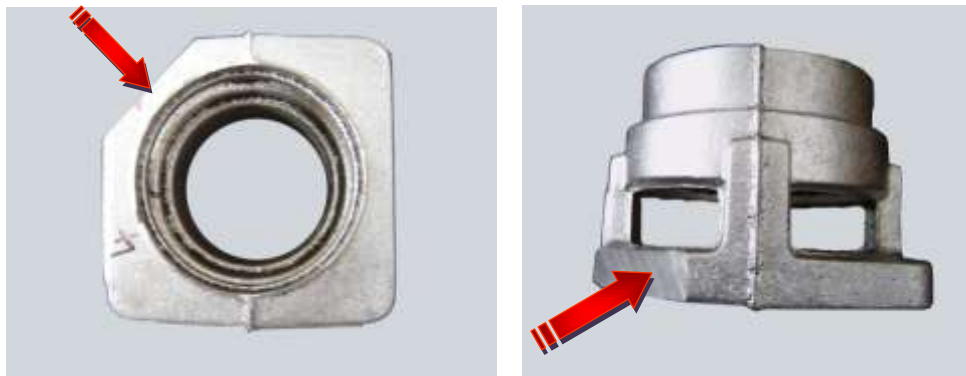
Prvek	Al	Si	Mn	Mg	Cu	Fe	Ni	Ti	Zn	Ca
Hm. %	83,60	10,56	0,17	0,39	0,036	0,519	0,014	0,089	0,020	0,005

Modelové zařízení viz obr. 1.2 ukazuje umístění dvou odlitků v jedné formě.



Obr. 1.6 Modelové zařízení odlitku č. 3

## 1.4 Odlitek číslo 4



Obr. 1.7 Fotografie odlitku číslo 4

Tab. 1.7 Základní popis odlitku č. 4

číslo odlitku		4
materiál odlitku		AlSi10Mg (424331)
hrubá hmotnost odlitku [kg]		0,7
označení odlitku		AH 2380
formování		strojní
počet jader		1
jádro		vstřelované
rozměry formovacího rámu [mm]	horní	450x350x150
	spodní	450x350x100
hmotnost tekutého kovu [kg]		1,3
lící teplota [°C]		720
tepelné zpracování		-

Tab. 1.8 Chemické složení odlitku č. 4

Prvek	Al	Si	Mn	Mg	Cu	Fe	Ni	Ti	Zn	Ca
Hm. %	82,07	8,90	0,16	0,33	0,017	0,507	0,013	0,073	0,027	0,003

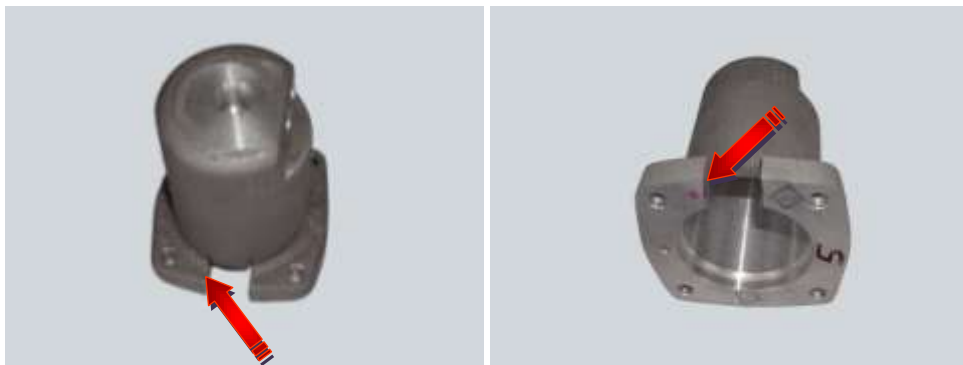
Modelové zařízení viz obr. 1.8 ukazuje umístění čtyř odlitků v jedné formě a vždy společné jedno jádro pro dva odlitky.



Obr. 1.8 Modelové zařízení odlitků č. 4



## 1.5 Odlitek číslo 5



Obr. 1.9 Fotografie odlitku číslo 5

Tab. 1.9 Základní popis odlitku č. 5

číslo odlitku		5
materiál odlitku		AlSi7Mg0,3
hrubá hmotnost odlitku [kg]		1,1
označení odlitku		AH 2488
formování		strojní
počet jader		1
jádro		vstřelované
rozměry formovacího rámu [mm]	horní	450x350x200
	spodní	450x350x100
hmotnost tekutého kovu [kg]		1,9
licí teplota [°C]		720
tepelné zpracování		rozpuštěcí žíhání s vytvrzováním

Tab. 1.10 Chemické složení odlitku č. 5

Prvek	Al	Si	Mn	Mg	Cu	Fe	Ni	Ti	Zn	Ca
Hm. %	87,33	8,09	0,05	0,32	0,051	0,189	0,017	0,148	0,007	0,002

Modelové zařízení viz obr. 1.10 ukazuje umístění čtyř odlitků v jedné formě.



Obr. 1.10 Modelové zařízení odlitků č. 5

## 1.6 Odlitek číslo 6



Obr. 1.11 Fotografie odlitku číslo 6

Tab. 1.11 Základní popis odlitku č. 6

číslo odlitku		6
materiál odlitku		AlSi7Mg0,3
hrubá hmotnost odlitku [kg]		1,9
označení odlitku		AH 3059
formování		strojní
počet jader		0
rozměry formovacího rámu [mm]	horní	450x350x150
	spodní	450x350x100
hmotnost tekutého kovu [kg]		3,5
lící teplota [°C]		720
tepelné zpracování		rozpuštěcí žíhání s vytvrzováním

Tab. 1.12 Chemické složení odlitku č. 6

Prvek	Al	Si	Mn	Mg	Cu	Fe	Ni	Ti	Zn	Ca
Hm. %	85,75	7,00	0,05	0,33	0,024	0,128	0,022	0,151	0,059	0,002

Modelové zařízení viz obr. 1.12 ukazuje umístění čtyř odlitků v jedné formě.



Obr. 1.12 Modelové zařízení odlitku č. 6

## 2 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU

Vlastnosti čistého hliníku jsou pro konstrukční účely nevyhovující. Proto se pro výrobu odlitků zásadně používají slitiny hliníku. Přísadové prvky zvyšují mechanické a zlepšují technologické vlastnosti. Výsledné vlastnosti slitin jsou dány množstvím a vzájemnou kombinací přísadových prvků. [2]

Slitiny hliníku lze klasifikovat podle jejich chemického složení. Druh slitiny určuje zejména základní prvek, kterým je u těchto slitin hliník. Další důležitou skupinou prvků jsou tzv. hlavní přísadové prvky, podle nichž se slitiny rozdělují na [2]:

- siluminy - slitiny Al – Si
- duralaluminium - slitiny Al – Cu
- hydronalium - slitiny Al – Mg

Další skupinou prvků ovlivňující vlastnosti slitin jsou tzv. vedlejší přísadové prvky. Tyto prvky jsou ve srovnání s hlavními přísadovými prvky ve slitinách obsaženy v menším měřítku. Zlepšují některé z důležitých předností daného typu slitiny, jako jsou mechanické vlastnosti a obrobitelnost. Také snižují nepříznivé účinky některých doprovodných prvků. Doprovodné prvky jsou takové, které do slitiny vniknou bez záměrného přidávání, a ve většině případů po překročení dané koncentrace zhoršují mechanické, chemické nebo technologické vlastnosti. Lze je nazvat jako nečistoty, jejichž původem jsou vsázkové suroviny, ale také se do slitiny mohou dostat z vyzdívky, náradí a dalších částí, které přicházejí s taveninou do styku. [2]

### 2.1 Slitiny odlitků č. 1 – 6

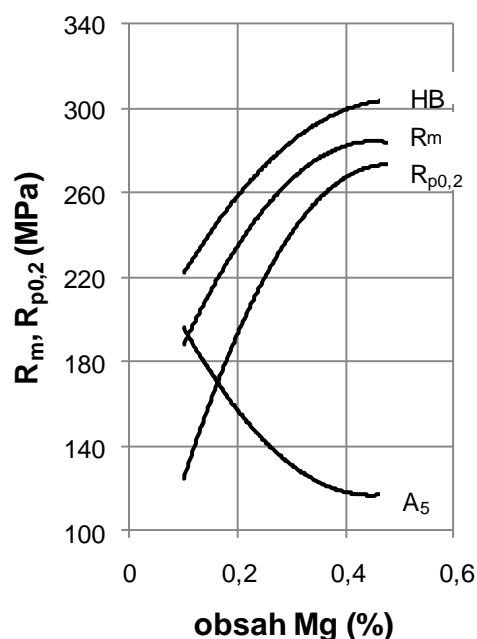
#### 2.1.1 Slitiny Al – Si – Mg

Přítomnost Mg u těchto slitin umožňuje vytvrzování za tepla. Obsah tohoto prvku bývá v množství 0,25 - 0,45 % (někdy až 0,7 %). Vliv Mg na mechanické vlastnosti již vytvrzené slitiny AlSi9, lité do pískové formy je znázorněn na obr. 2.1. [2]

Vlastnosti těchto slitin v litém stavu jsou pouze průměrné, teprve po vytvrzení získávají vynikající mechanické vlastnosti. Vytvrzením se zvyšuje  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ , HB a obrobitelnost, ale zároveň se snižuje tažnost. Lepší slévárenské vlastnosti a svařitelnost jsou u slitin, které obsahují vyšší obsah přítomného křemíku. [2]

Slitiny Al – Si – Mg se nejčastěji odlévají gravitačně do pískových nebo kovových forem, avšak odlévat je lze i pod tlakem. [2]

Použití těchto slitin je vhodné pro vysoce namáhané součásti. Nejčastěji v leteckém a v automobilovém průmyslu. [2]



Obr. 2.1 Vliv hořčíku na mechanické vlastnosti slitiny AlSi9 po vytvrzení [2]



### 2.1.2 Slitiny AlSi7Mg0,3 a AlSi10Mg a jejich vlastnosti:

Tab. 2.1 Vlastnosti slitin Al-Si-Mg [2]

Chemické označení slitiny			
Charakteristika	Odlévání	Tepelné zpracování	Použití
<b>AlSi7Mg0,3</b>			
vysokopevné slitiny s dobrou tažností a houževnatostí, minimální množství nečistot a příměsí, velmi dobré slévárenské vlastnosti, dobrá odolnost proti korozi, obrobitelnost a svařitelnost	pískové formy, kovové formy gravitační nebo nízkotlaké lití	vytvrditelné, stav T6 (rozpuštěcí žhání 530-535°C - 12 hod/ ochlazení do teplé vody/ precipitace 150-160 °C - 3-5 hod.), nebo T7 – vytvrzení a stabilizace (200-250 °C – 2-5 hod.)	součástky pro letecký a raketový průmysl, motorové díly, součásti podvozků, rámy atd.
<b>AlSi10Mg</b>			
mírně podeutektické slitiny s nízkým obsahem doprovodných prvků a nečistot, výborné slévárenské a technologické vlastnosti, výborná obrobitelnost a odolnost proti korozi	všechny technologie odlévání, při tuhnutí netvoří vnitřní staženiny	vytvrzování – T6, rozpuštěcí žhání 510-525 °C – 3-6 hod./ ochlazení ve vodě/ precipitační žhání 150-175 °C – 5-15 hod.	tenkostěnné tvarově složité odlitky, vysoce namáhané strojní součásti, díly motorů, klikové skříně, brzdové čelisti, rychloběžné součástky, např. pro ventilátory

Tab. 2.2 Materiály odlitků

Odlitek číslo	Materiál
1	AlSi10Mg
2	AlSi10Mg
3	AlSi10Mg
4	AlSi10Mg
5	AlSi7Mg0,3
6	AlSi7Mg0,3

### 3 METALOGRAFICKÉ VYHODNOCENÍ VZORKŮ

#### 3.1 Teorie metalografie

Cílem porovnání struktury metalografických vzorků je získat co nejvíce informací o struktuře materiálu, o vlivu takových procesů působících na materiál během výroby, které změnilly charakter struktury, všeobecné informace o jednotlivých mikrolokalitách vnitřní struktury materiálu a informace o metalurgické čistotě materiálu. Na základě toho, jaké informace o struktuře potřebujeme získat, a do jaké hloubky je následně využijeme, volíme odpovídající metody metalografických hodnocení a pozorování. Tato kapitola se věnuje optické metalografii – mikroskopii. [3]

Pomocí optické mikroskopie je možné získat následující informace o struktuře hliníkových slitin [3]:

- charakter přítomných intermetalických fází – tvar, typ, velikost a rozložení,
- hodnocení mikročistoty materiálu,
- hodnocení kvality homogenizace,
- charakter a velikost zrna,
- mikroskopické heterogenity materiálu – obohacená zóna, hrubé fáze atd.,
- vady mikrostruktury způsobené technologií – porezita, přehřátí materiálu atd.

#### 3.2 Příprava vzorků

Řezání a příprava metalografických vzorků byla prováděna na pracovišti Ústavu materiálových věd a inženýrství - VUT FSI v Brně. Vybraná místa pro odebrání vzorků u jednotlivých odlitků jsou vyznačena červenou šipkou na obr. 1.1, obr. 1.3, obr. 1.5, obr. 1.7, obr. 1.9 a obr. 1.11. Označení těchto vzorků je shodné s číselným označením konkrétního odlitku. Vzorky byly vyřezány na řezačce STRUERS – DISCOTOM - 5 viz foto obr. 3.1. Následně byly zality do dentacrylu a zalisovány za tepla v zařízení STRUERS LABOPRESS 3 (obr. 3.2), přičemž odměřené množství práškového dentacrylu bylo nasypáno do tlakové komory, a za teploty 180 °C při tlaku 20 kPa došlo k zalisování vzorku. Následovalo broušení na brusných papírech s odstupňovanými hrubostmi 280, 600, 1200 a 4000, leštění diamantovou pastou a konečné doleštění přípravkem OPS. Následovalo sledování struktury na světelném mikroskopu OLYMPUS PMG-3 (obr. 3.3) s připojeným fotoaparátém OLYMPUS DP - 11. Některé snímky byly pořízeny také na pracovišti Odboru slévárenství VUT FSI Brno na světelném mikroskopu Model MTM 406 s připojeným fotoaparátém OLYMPUS E – 510.



Obr. 3.1 Řezačka DISCOTOM - 5



Obr. 3.2 LABOPRESS - 3



Obr. 3.3 Světelný mikroskop OLYMPUS PMG-3



Obr. 3.4 Světelný mikroskop Model MTM 406 a stereoskopický mikroskop STM 723 ZOOM

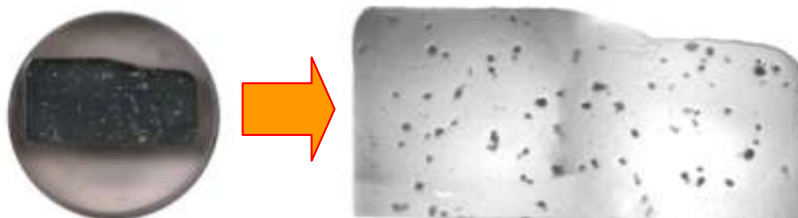
### 3.3 Snímky pořízené stereoskopickým mikroskopem

Fotografie (obr. 3.5, obr. 3.9, obr. 3.14, obr. 3.18, obr. 3.21, obr. 3.23) ukazují makroskopické rozložení porezity na jednotlivých vzorcích.

### 3.4 Zobrazení mikro a makro struktury odlitků

V následujících podkapitolách jsou zobrazeny snímky pořízené optickým mikroskopem (zvětšení 40 x, 100 x, 200 x, 400 x a 500 x) a stereoskopickým mikroskopem s viditelnou makrostrukturou jednotlivých vzorků daných odlitků a viditelným rozložením porezity.

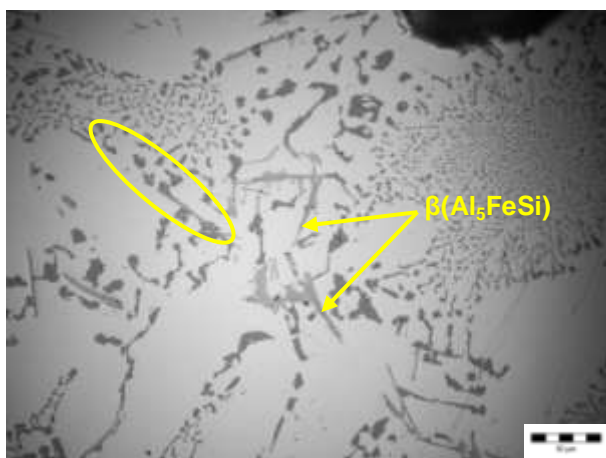
#### 3.4.1 Vzorek č. 1



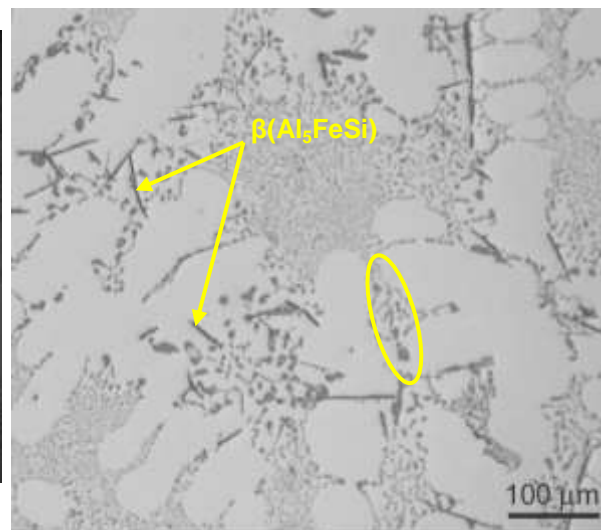
Obr. 3.5 Makrostruktura vzorku č. 1 s výraznou porezitou

Na snímcích obr. 3.6 a obr. 3.7 lze pozorovat značný výskyt  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází (jehlice), a také celkem hrubá zrna Si na okrajích eutektických buněk, což může být způsobeno přemodifikováním struktury.



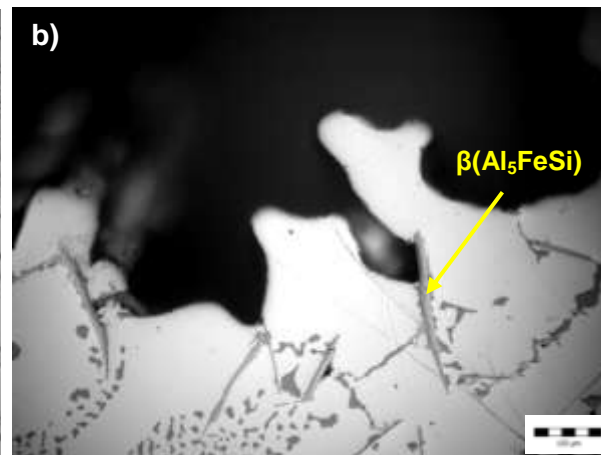
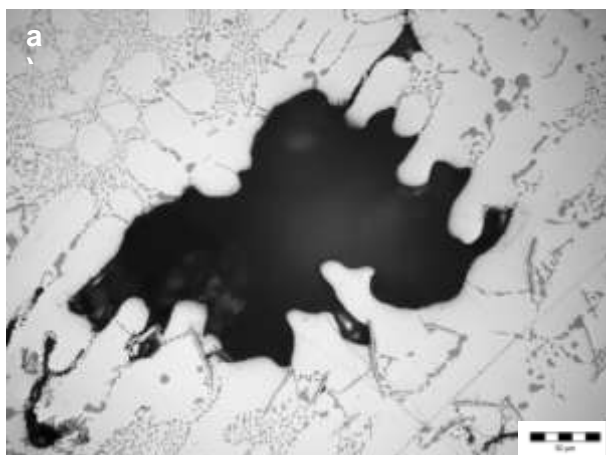


Obr. 3.6 Slitina AlSi10Mg, zv. 400 x



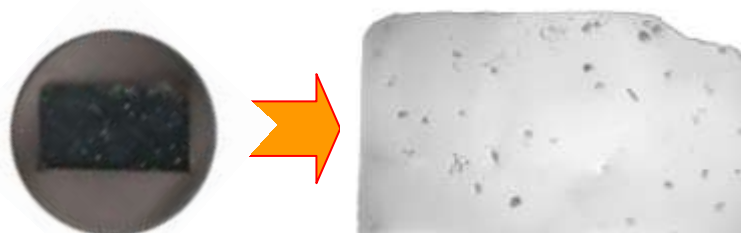
Obr. 3.7 Slitina AlSi10Mg, zv. 100 x

Na obr. 3.8 je mezidendritická porezita, v dolní části póru lze pozorovat  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fázi, která by mohla být jednou z příčin zabránění přísunu taveniny a následného vzniku póru.



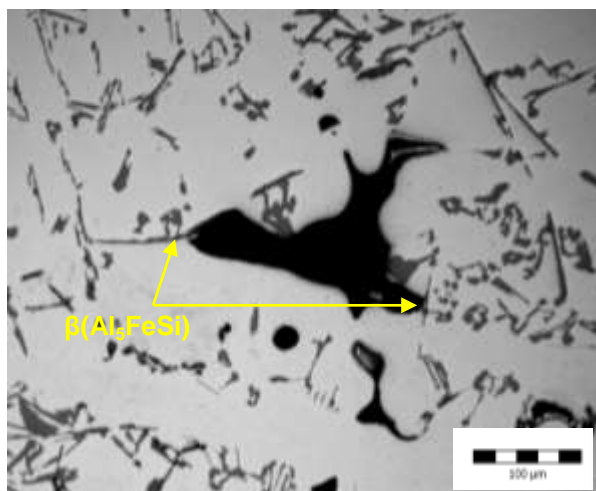
Obr. 3.8 Slitina AlSi10Mg: a) zv. 200 x; b) zv. 400 x

### 3.4.2 Vzorek č. 2

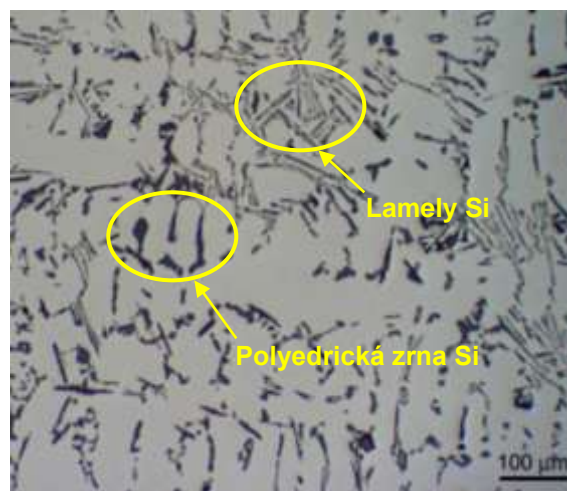


Obr. 3.9 Makrostruktura vzorku č. 2 s výraznou porezitou

Na obr. 3.10 lze pozorovat výskyt póru (kombinace plynové dutiny a mikrostaženiny) opět s brzděným přísunem taveniny vlivem  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází. Na dalším snímku stejného vzorku obr. 3.11 můžeme vidět nemodifikovanou strukturu eutektika, eutektický křemík je vyloučen ve tvaru polyedrických zrn a hrubých lamel. [2]

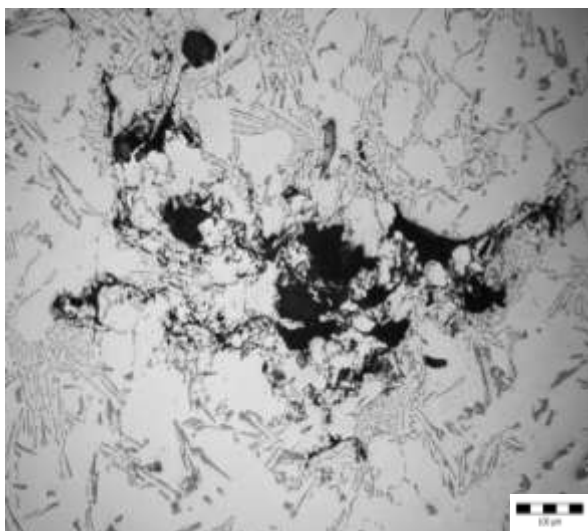


Obr. 3.10 Slitina AlSi10Mg, zv. 200x

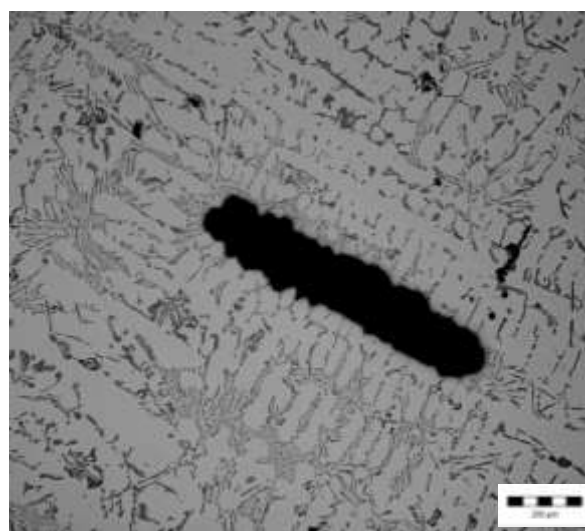


Obr. 3.11 Slitina AlSi10Mg, zv. 100 x

Na snímku obr. 3.12 lze pozorovat shluk oxidických blan s výskytem porezity těsně pod povrchem odlitku. Tyto shluky lze pozorovat i na makrostruktuře vzorku viz obr. 3.9 vzorek č. 2. obr. 3.13 znázorňuje typickou mikrostaženinu.

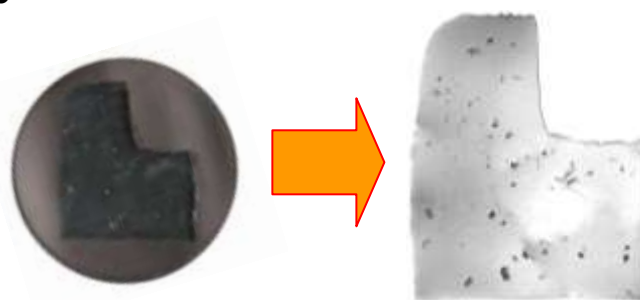


Obr. 3.12 Slitina AlSi10Mg, zv. 200x



Obr. 3.13 Slitina AlSi10Mg, zv. 100x

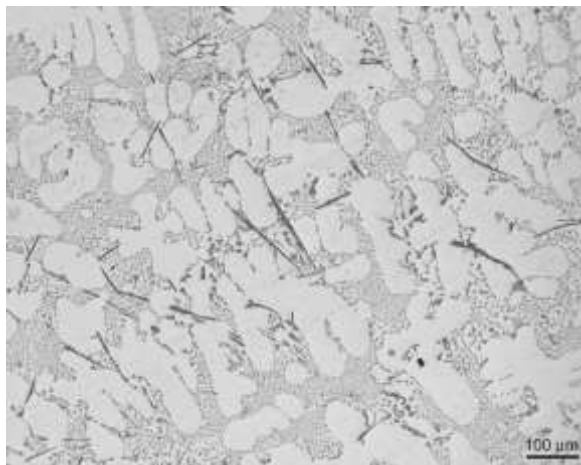
### 3.4.3 Vzorek č. 3



Obr. 3.14 Makrostruktura vzorku č. 3 s výraznou porezitou

Na obr. 3.15 lze pozorovat opět výrazný podíl  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází (jehlice). Na obr. 3.16 je výrazná porezita (kombinace plynové dutiny a mikrostaženiny), ale v okolí nejsou pozorovatelné žádné  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze.



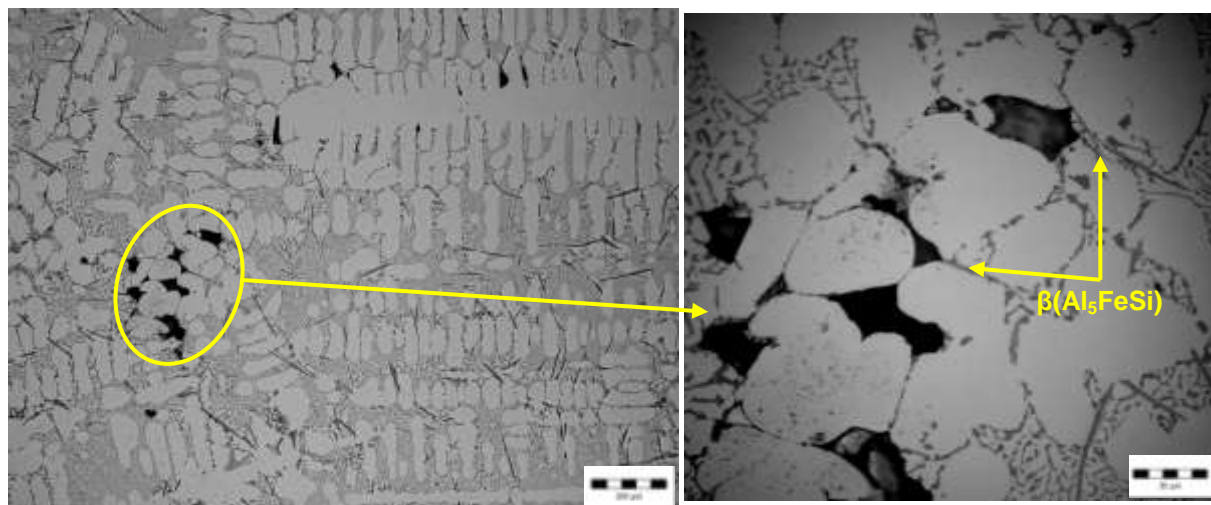


Obr. 3.15 Slitina AlSi10Mg, zv. 100x



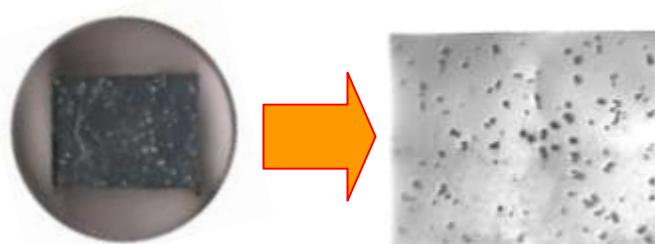
Obr. 3.16 Slitina AlSi10Mg, zv. 200x

Na obr. 3.17 se vyskytují mezidendritické póry, některé vznikající vlivem přerušení přísunu taveniny  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fázemi (jehlicemi). Opět lze pozorovat značné množství této fáze v celém mikrosnímku.



Obr. 3.17 Slitina AlSi10Mg: a) zv. 100x; b) zv. 400x

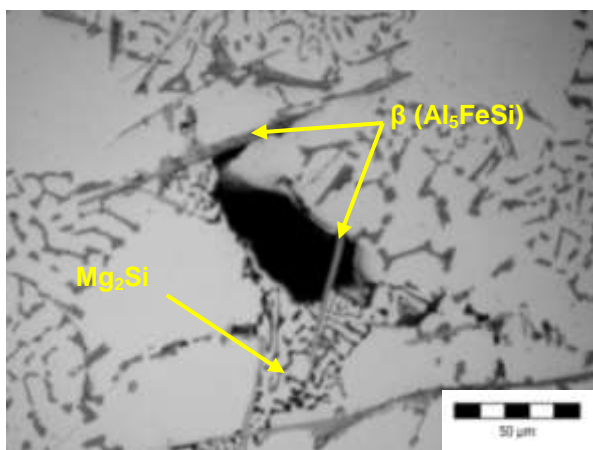
#### 3.4.4 Vzorek č. 4



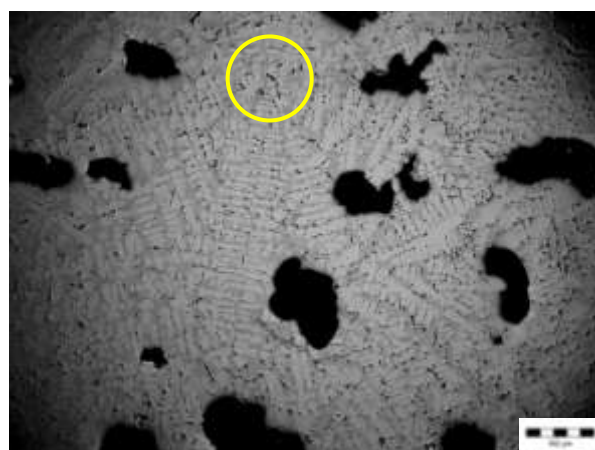
Obr. 3.18 Makrostruktura vzorku č. 4 s výraznou porezitou

Na snímku obr. 3.19 lze pozorovat porezitu vznikající pravděpodobně opět přerušením přísunu taveniny vlivem  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází (jehlice). Lze také sledovat výskyt intermetalické

fáze  $Mg_2Si$ , která působí nepříznivě na tažnost materiálu. Na dalším obrázku obr. 3.20 můžeme sledovat rozložení porezity, většinou vzniklé kombinací mikrostaženin a plynových dutin. Vyskytuje se zde dokonce i zárodek zrna s vyrůstajícími dendrity.

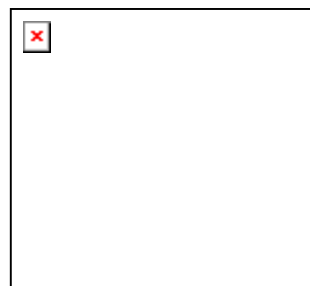
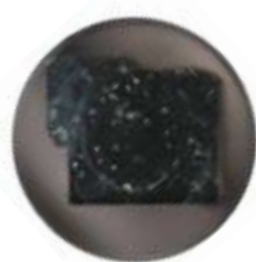


Obr. 3.19 Slitina AlSi10Mg, zv. 400 x



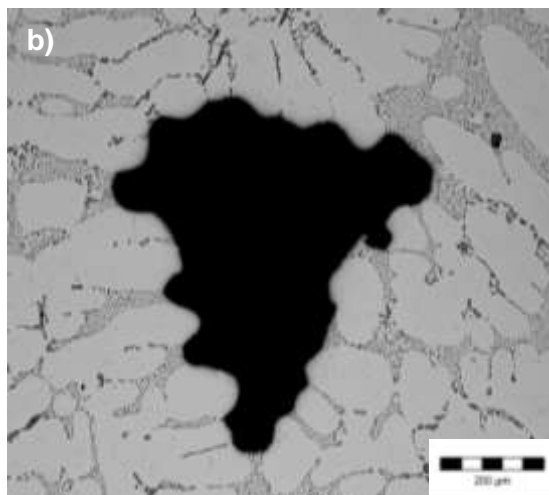
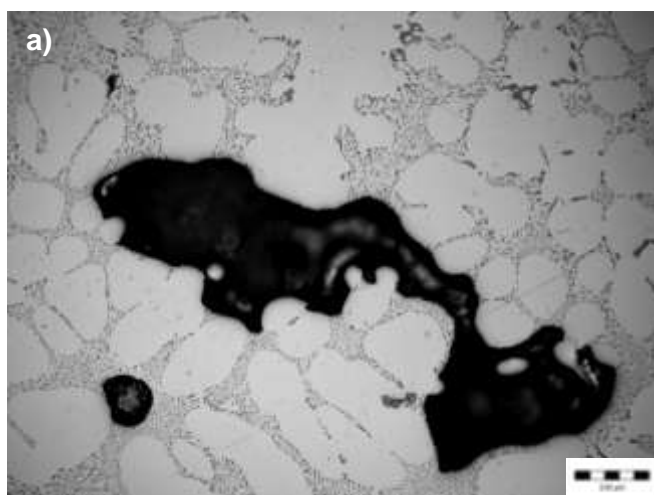
Obr. 3.20 Slitina AlSi10Mg, zv. 40 x

### 3.4.5 Vzorek č. 5



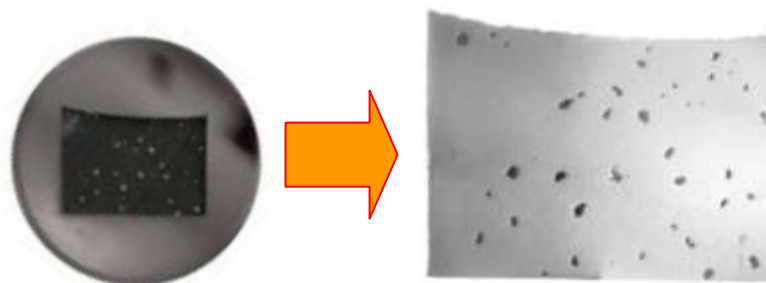
Obr. 3.21 Makrostruktura vzorku č. 5 s výraznou porezitou

Na obr. 3.22 se vyskytuje porezita vzniklá pravděpodobně kombinací naplynělosti a mikrostaženiny.



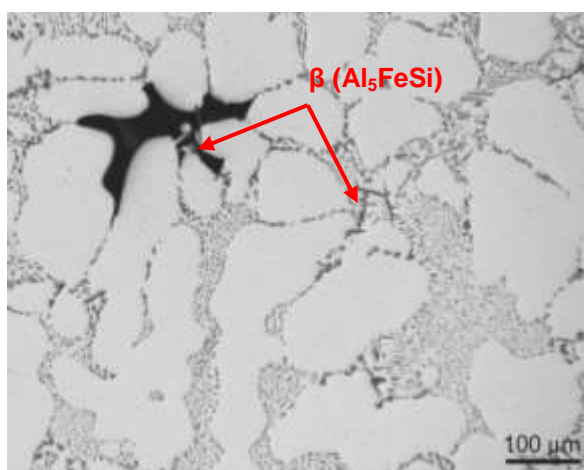
Obr. 3.22 Slitina AlSi7Mg0,3: a) zv. 200 x; b) zv. 100 x

### 3.4.6 Vzorek č. 6

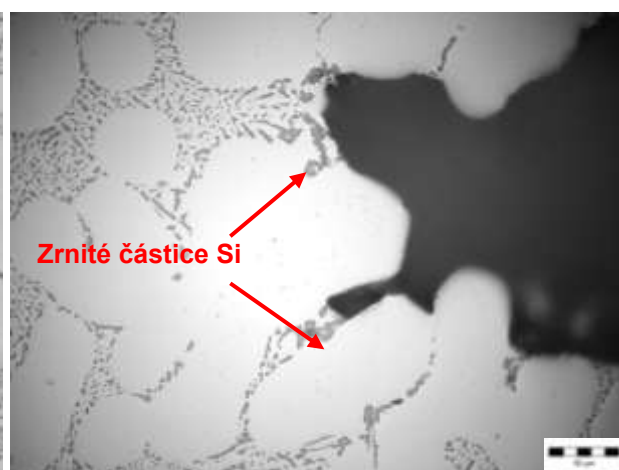


Obr. 3.23 Makrostruktura vzorku č. 6 s výraznou porezitou

Na obr. 3.24 lze opět pozorovat výskyt mezidendritické porezity s výskytem  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze uvnitř tohoto póru a také mimo porezitu. Na dalším obrázku obr. 3.25 je opět porezita tentokrát bez přítomnosti  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ), dále zde lze sledovat částice zrnitého křemíku, které vznikly pravděpodobně přemodifikováním taveniny.



Obr. 3.24 Slitina  $\text{AlSi7Mg0,3}$ , zv. 100 x



Obr. 3.25 Slitina  $\text{AlSi7Mg0,3}$ , zv. 400 x

## 3.5 Vyhodnocení vzorků

Z uvedených snímků lze konstatovat, že největším problémem vybraných odlitků je vznikající porezita kombinací mikrostaženin i bublin. Na některých snímcích (obr. 3.8, obr. 3.10, obr. 3.19 a obr. 3.24) je vznik mikrostaženin pravděpodobně zapříčiněn také přítomností  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází, ovšem pouze u odlitků č. 1 – 4 (slitina  $\text{AlSi10MgMn}$ ). U odlitků č. 5 a 6 (slitina  $\text{AlSi7Mg0,3}$ ) se tyto fáze vyskytují také, ale nemají tak významný vliv na vznik mikrostaženin jako u odlitků č. 1 – 4. Je tedy vhodné věnovat se nejen problému naplynění (příp. odplynování) taveniny ve společnosti, ale také podílu  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází ve struktuře.

Kromě porezity jsou častým výskytem ve struktuře celkem hrubá zrna Si na okrajích eutektických buněk, což je pravděpodobně způsobeno přemodifikováním struktury viz [2]. Dalším problémem je u odlitku č. 2 téměř chybějící proces modifikace způsobený pravděpodobně odezněním modifikačního účinku, proto by tento úkon úpravy taveniny měl být více kontrolován.

## 4 ANALÝZA VZORKŮ ELEKTRONOVÝM RASTROVACÍM MIKROSKOPEM

### 4.1 Princip rastrovacího elektronového mikroskopu

Elektronová mikroskopie je jednou z moderních metod zkoumání struktury materiálů a slouží především k přesné identifikaci chemického složení jednotlivých nejen intermetalických fází přítomných ve struktuře. [4]

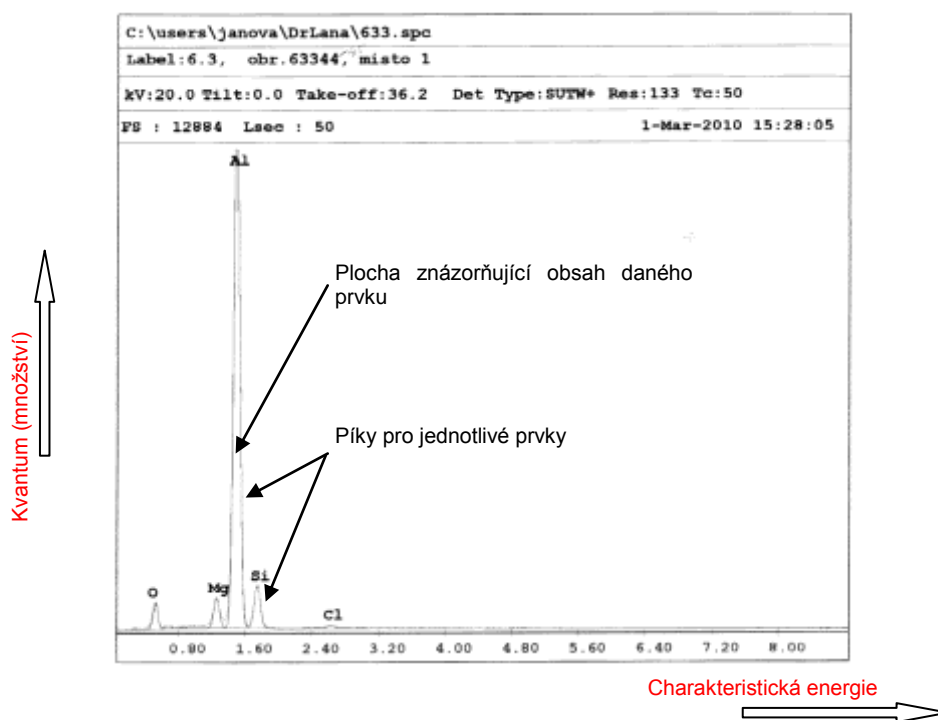
Snímky v této kapitole byly pořízeny rastrovacím elektronovým mikroskopem na pracovišti Ústavu materiálového inženýrství – FSI VUT v Brně. Tento rastrovací elektronový mikroskop (angl. Scanning Electron Microscope, SEM) využívá k zobrazování pohyblivý svazek elektronů. Umožňuje mnohem větší zvětšení s velkou hloubkou ostrosti než je možné u optického mikroskopu, jelikož zdrojem signálu je na rozdíl od světelného vlnění proud elektronů generovaný z katody (žhavené wolframové vlákno) z níž jsou vysokým napětím vytrhávány elektrony a dále soustředovány v tenkém svazku na dané místo. Dopadající svazek vysokým napětím urychlených elektronů (primární elektrony) vlivem jejich velké energie v každém místě dotyku vzorku z povrchu vyrazí elektrony s různou energií a v různém směru, které poskytují o vzorku nejdůležitější informace. Jednotlivé typy těchto elektronů jsou sekundární (energie do 50 eV), zpětně odražené (energie od 50 eV do energie primárního elektronu) a Augerovy (energie vyšší než 50 eV, ale menší než primární elektron). V případě zobrazení snímků uvedených v této kapitole bylo využito pouze tzv. sekundárních elektronů. [5]



Obr. 4.1 Rastrovací elektronový mikroskop PHILIPS XL - 30



Podle materiálu místa, na který dopadá svazek primárních elektronů je různá hloubka proniknutí elektronů, a podle energie odražených elektronů je vykreslen tzv. histogram četností (obr. 4.2). Tento histogram zobrazuje počet naměřených kvant, které jsou srovnány s počtem kvant pro daný čistý prvek, jehož hodnota musí být vynásobena tzv. ZAF koeficientem (atomové číslo, fluorescence...), jelikož analyzované místo je směs a ne čistá látka a tyto směsi se navzájem ovlivňují. Pod jednotlivým „píkem“ je plocha integrací přepočtena na %. Na vodorovné ose histogramu jsou charakteristické energie pro jednotlivé prvky (např. Al = 1,4, Fe = 6,4, Si = 1,7).



Obr. 4.2 Histogram četností kvant

## 4.2 Analyzované vzorky

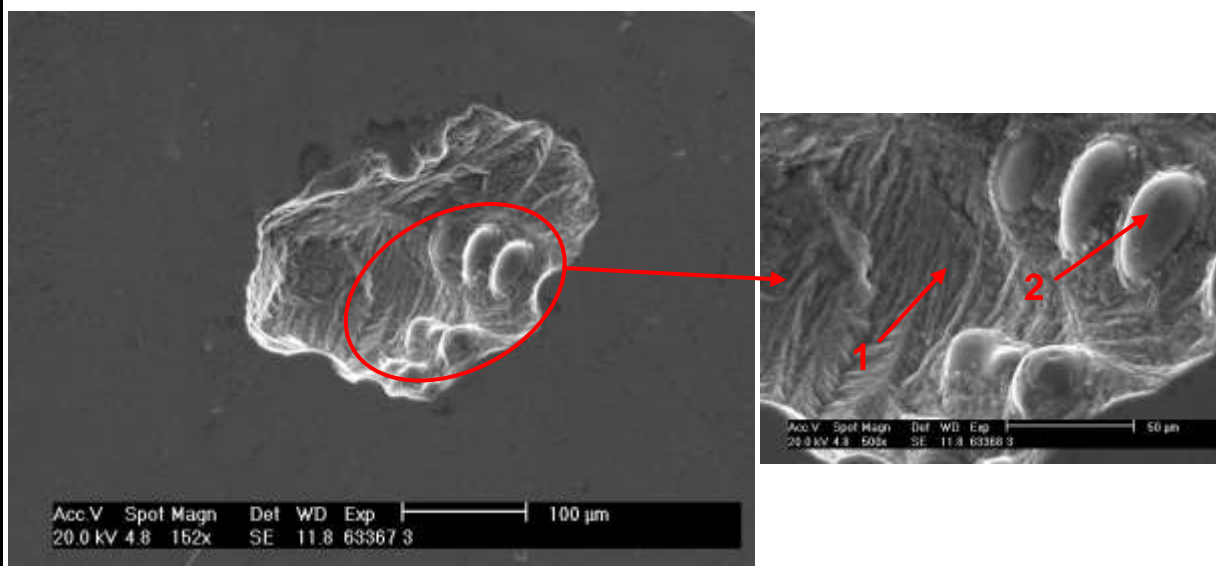
Vzhledem k velkému počtu vzorků byly vybrány pro analýzu tři reprezentující vzorky (vzorek č. 3, vzorek č. 4 a vzorek č. 6). Použité vzorky jsou ty, které již byly použity pro metalografické hodnocení. Histogramy četností jednotlivých analýz jsou uvedeny v příloze č. 1 této diplomové práce,

### 4.2.1 Vzorek č. 3

Na vzorku č. 3 (slitina AlSi10Mg) byla analyzována místa porezity a jejich okolí.

#### Snímek č. 63367 a 63368

Na obr. 4.3 je porezita s poměrně hladkým ohraničením a prorůstajícími dendrity  $\alpha$  (Al) (ověřeno analýzou viz tab. 4.1) z čehož lze usuzovat, že se jedná o kombinaci plynové dutiny a mikrostaženiny, obklopenou zrnitými i jehlicovitým Si, což mohlo vzniknout nedokonalou modifikací.



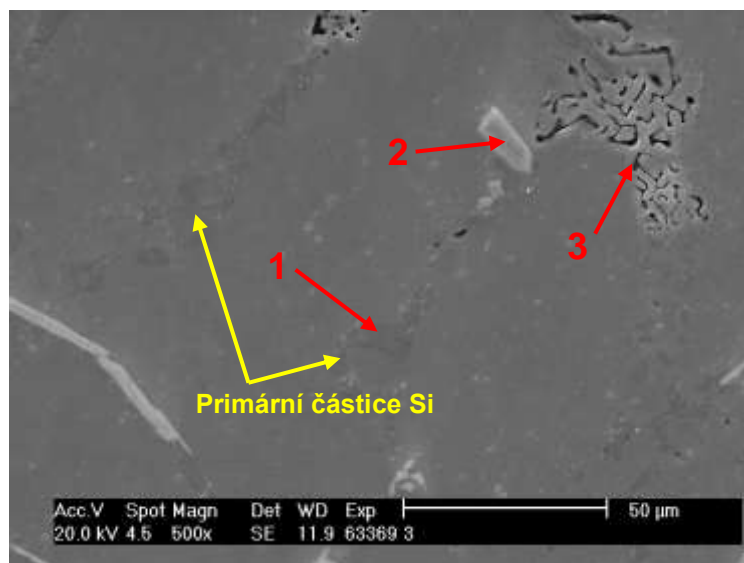
Obr. 4.3 Vzorek 3, snímek č. 63367 a 63368

Tab. 4.1 Chemické složení analyzovaných míst 1, 2 vzorku č. 3

Snímek	Místo	Al		Si	
		Wt %	At %	Wt %	At %
63367, 63368	1	82,39	82,97	17,61	17,03
	2	100	100	-	-

#### Snímek č. 63369

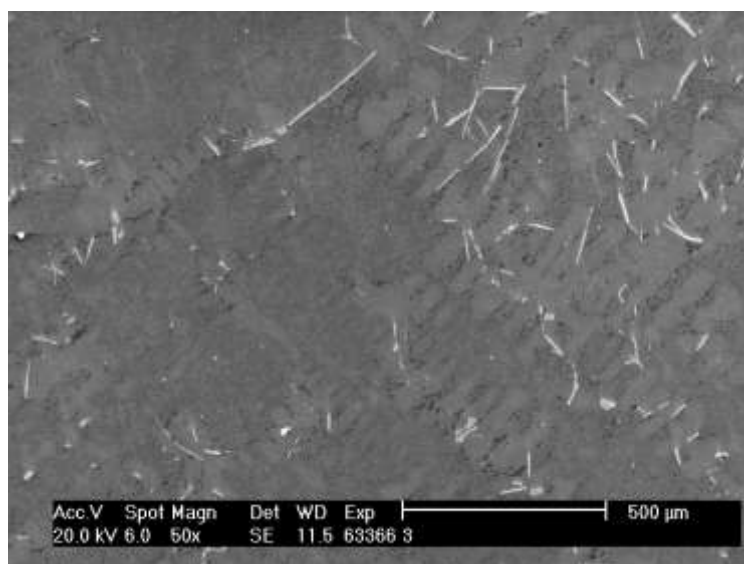
Na obr. 4.4 se vyskytují tmavší mapky 1, které byly zanalyzovány jako eutektikum Si. Dále se zde vyskytují větší částice 2, analýzou ověřeno, že se jedná o primární částice Si. Jemné černé útvary byly také zanalyzovány a pravděpodobně se jedná o fáze  $Mg_2Si$ .



Obr. 4.4 Vzorek 3, snímek č. 63369

#### Snímek č. 63366

Na obr. 4.5 je viditelné rozsáhlé množství  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází nerovnoměrně rozložených. Dále je viditelné i jemně zrnité eutektikum a dendrity  $\alpha$  (Al) obklopené hrubšími zrny Si.



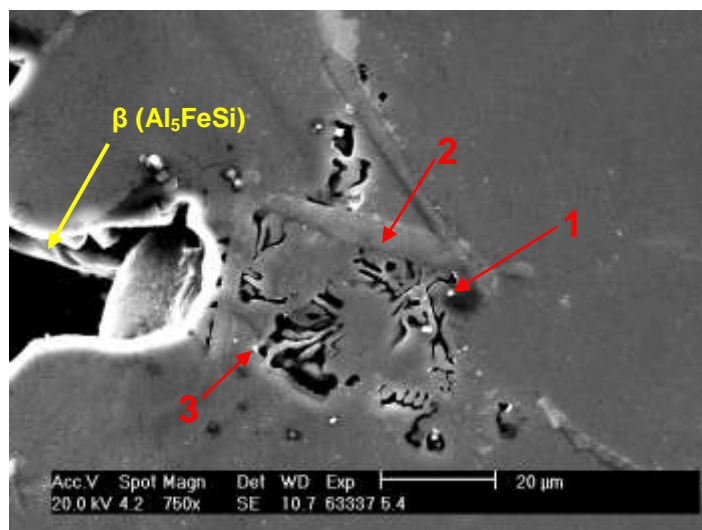
Obr. 4.5 Vzorek č. 3, snímek č. 63366

#### 4.2.2 Vzorek č. 4

Na vzorku č. 4 (slitina  $\text{AlSi10Mg}$ ) byla analyzována místa porezity a jejich okolí.

#### Snímek č. 63337

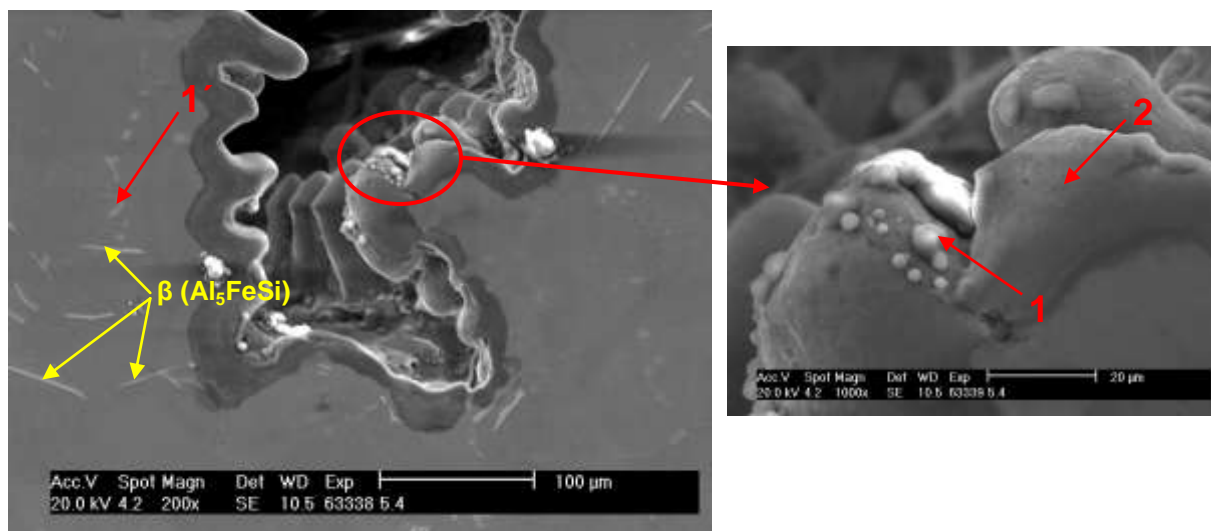
Dle chemického složení uvedeného v příloze 1 je v místě 2 intermetalická fáze o délce 40 – 60  $\mu\text{m}$ , pravděpodobně se jedná o  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fázi. Tato fáze je viditelná také uvnitř porezity viz obr. 4.6. Bílé drobné částčky ozn. 1 byly zanalyzovány, a zřejmě se jedná o Pb, což je považováno za nečistotu ve slitině.



Obr. 4.6 Vzorek č. 4, snímek č. 63337

#### Snímek č. 63338 a č. 63339

Na obr. 4.7 je mikrostaženina o velikosti cca 250  $\mu\text{m}$  s viditelnými dendrity. Bílé útvary v okolí mikrostaženiny (obr. 4.7) byly analyzovány, a lze konstatovat, že se opravdu jedná o  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fázi o velikosti zhruba 50  $\mu\text{m}$ . Okolí mikrostaženiny je ohraničeno dendrity  $\alpha$  (Al) s viditelným prorůstáním do mikrostaženiny. V okolí se nacházejí další světlejší útvary 1', u kterých bylo analýzou zjištěno, že se jedná o Si viz tab. 4.2. Přítomný kyslík má nejpravděpodobnější původ ve vodní páře, Cl prokazuje, že k čištění taveniny byly použity tablety obsahující halogenidy (nejvýznamněji je zastoupen Cl).



Obr. 4.7 Vzorek č. 4, snímky č. 63338 a 63339

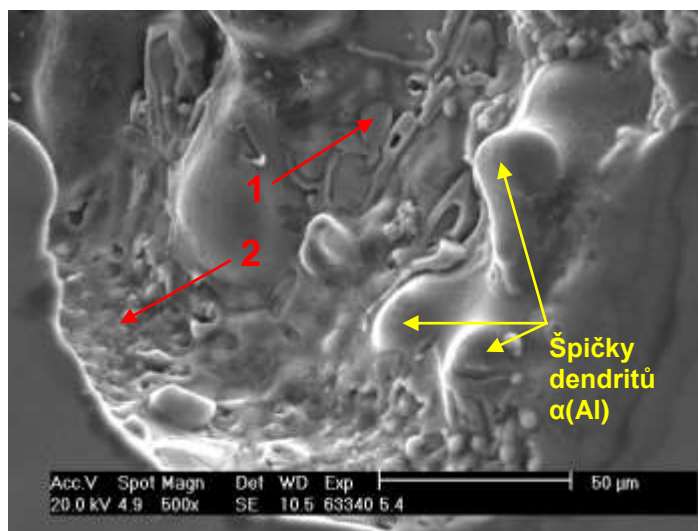
Tab. 4.2 Chemické složení analyzovaných míst 1,1, 2, vzorku č. 4

Snímek	Místo	Al		Si		O		Cl	
		Wt %	At %	Wt %	At %	Wt %	At %	Wt %	At %
63338, 63339	1'	20,75	21,16	77,64	76,07	1,62	2,78	-	-
	1	35,2	25,63	0,94	0,66	56,88	69,85	6,98	3,87
	2	95,77	94,01	1,43	1,35	2,8	4,64	-	-



### Snímek č. 63340

V oblasti 1 uvnitř mikrostaženiny byly analýzou zjištěny útvary obsahující Fe vždy doprovázeny Mn (tab. 4.3). V tomto případě by se mohlo jednat o kompaktní  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ ) fázi. Uvnitř mikrostaženiny se celkově vyskytuje velké množství železa.



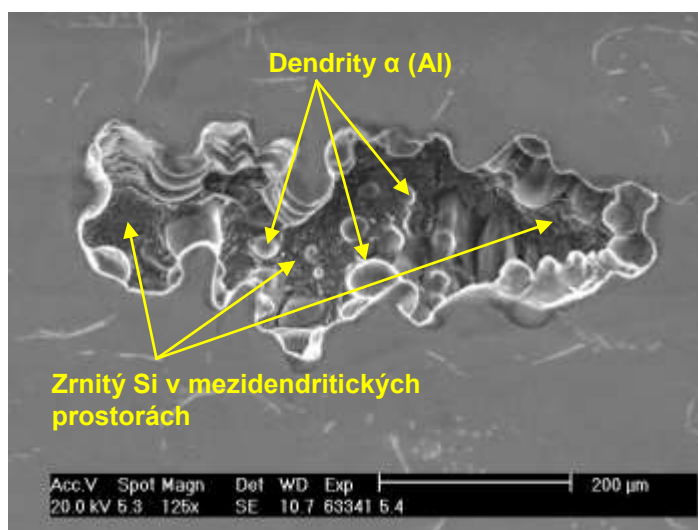
Obr. 4.8 Vzorek č. 4, snímek č. 63340

Tab. 4.3 Chemické složení analyzovaných míst 1, 2 vzorku 4

Snímek	Místo	Al		Si		Mn		Fe		O	
		Wt %	At %	Wt %	At %	Wt %	At %	Wt %	At %	Wt %	At %
63340	1	39,09	56,34	1,53	2,11	15,44	10,93	43,95	30,61	-	-
	2	37,96	37,53	57,11	54,24	-	-	-	-	4,94	8,23

### Snímek č. 63341

Na vzorku č. 4 se vyskytují také čisté mezidendritické staženiny jako je zobrazena na obr. 4.9, ale opět v okolí staženiny jsou analýzou ověřené viditelné  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze.



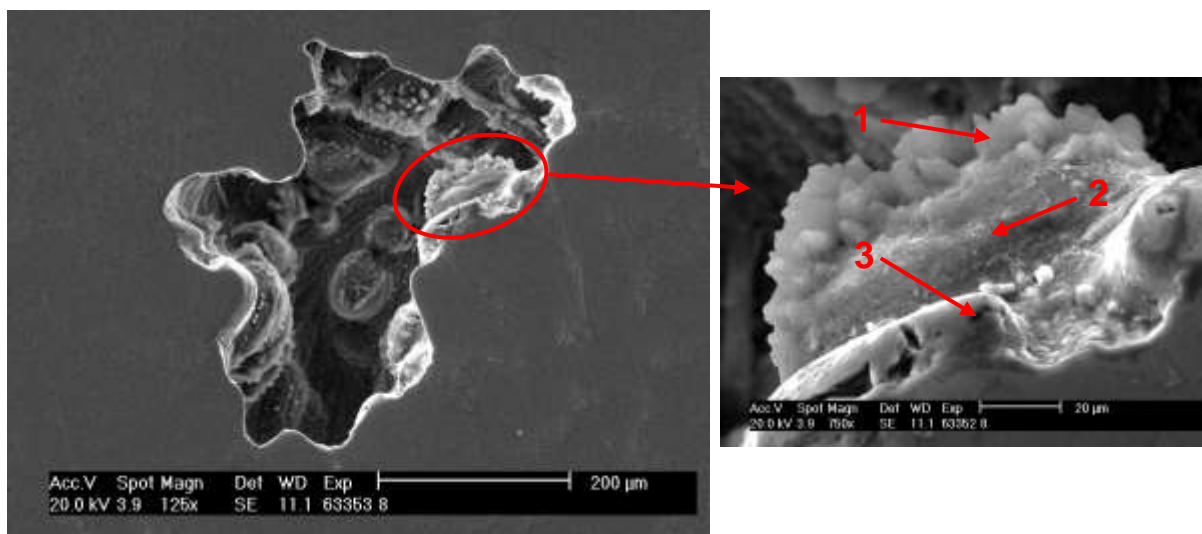
Obr. 4.9 Čistá mezidendritická staženina

### 4.2.3 Vzorek č. 6

Na vzorku č. 6 (slitina  $\text{AlSi7Mg0,3}$ ) byla analyzována místa porezity a jejich okolí.

#### Snímek č. 63352 a č. 63353

Na obr. 4.10 je vyfocena mikrostáženina o velikosti cca  $440 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ . Výrůstky 1 jsou tvořeny zoxidovaným Si rostoucím na dendritech  $\alpha(\text{Al})$  viz tab. 4.4. Pravděpodobně se opět jedná o vliv disociované vody z vodní páry, ale bohužel dostupnými prostředky nebylo prokázáno, může se tedy jednat i o druhotný produkt vzniklý při přípravě vzorku.



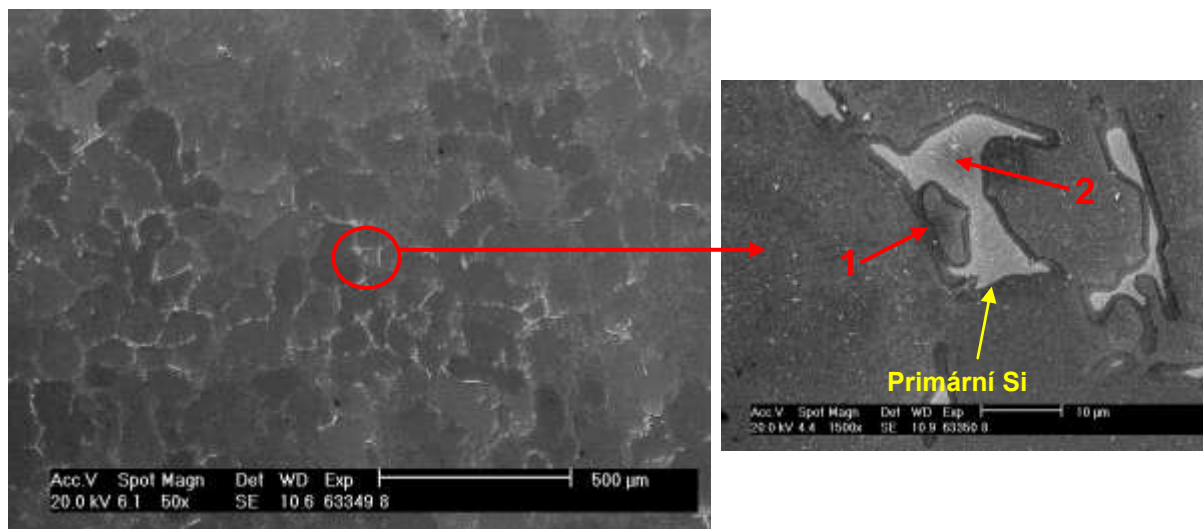
Obr. 4.10 Vzorek č. 6, snímek č. 63352 a 63353

Tab. 4.4 Chemické složení analyzovaných míst 1, 2, 3 vzorku č. 6

Snímek	Místo	Al		Si		O		Na	
		Wt %	At %	Wt %	At %	Wt %	At %	Wt %	At %
63352, 63353	1	25,95	20,07	29,37	21,82	44,27	57,74	0,41	0,37
	2	72,12	66,03	13,66	12,01	14,22	21,96	-	-
	3	98,96	99	1,04	1	-	-	-	-

#### Snímek č. 63349, 63350 a 63351

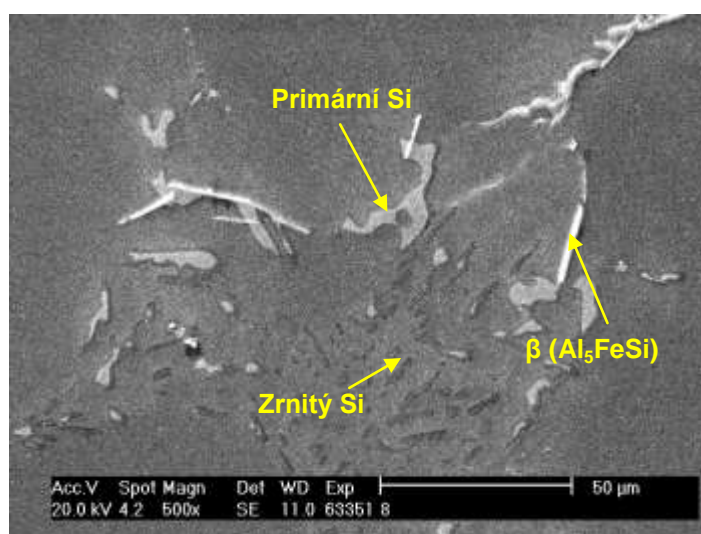
Na obr. 4.11 lze v porovnání s předchozím odlitkem viz obr. 4.5 pozorovat poměrně menší množství  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze. Jsou zde vidět i ohraničená zrna velkými částicemi zrnitého Si. Detailnější rozložení a náznak ohraničení je vidět také na obr. 4.12.



Obr. 4.11 Vzorek 6, snímek č. 63349 a 63350

Tab. 4.5 Chemické složení analyzovaných míst 1, 2 vzorku č. 6

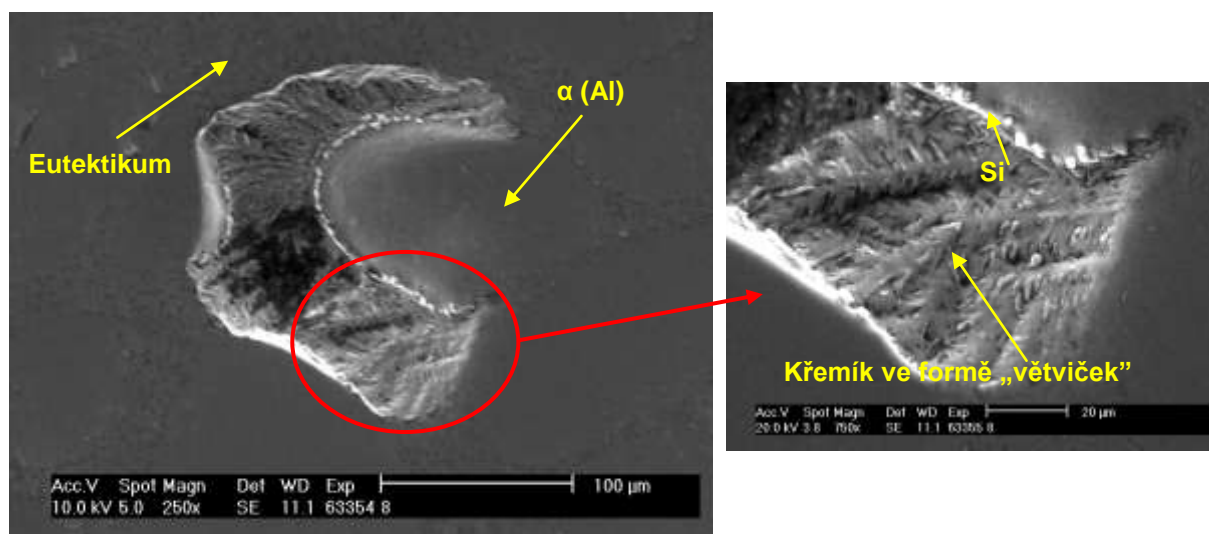
Snímek	Místo	Al		Si	
		Wt %	At %	Wt %	At %
63349, 63350	1	6,54	6,79	93,46	93,21
	2	28,72	29,55	71,28	70,45



Obr. 4.12 Vzorek č. 6, snímek č. 63351

### Snímek č. 63354 a č. 63355

Na obr. 4.13 je čistý mezidendritický prostor, kde nebyl dostatek Si, aby došlo k úplnému zaplnění dutiny. Prostor je ohraničený většími částicemi Si.



Obr. 4.13 Vzorek č.6, snímek č. 63354 a 63355

## 4.3 Shrnutí provedené analýzy

Na závěr této kapitoly lze potvrdit, že analýzou bylo ověřeno, že vyskytující se „jehlice“ na metalografických výbrusech (kapitola č. 3) jsou opravdu nežádoucí  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze, které se mohou podílet na vzniku některých mikrostaženin viz snímky v kapitole č. 3. Dále bylo ověřeno, že velké částice, vyskytující se na hranicích eutektika jsou primární částice Si vznikající pravděpodobně přemodifikováním taveniny.

Záznamy analýzy s vykreslenými histogramy a chemickým složením jsou uvedeny v příloze č. 1 této diplomové práce.

## 5 VNITŘNÍ VADY VYSKYTUJÍCÍ SE V ODLITCÍCH

Z předchozích kapitol č. 5 a 6 vyplývá několik vnitřních vad, na které je důležité se nejvíce zaměřit a nalézt řešení k zabránění jejich opakovanému vzniku. Vnitřní vady vyskytující se ve strukturách jednotlivých odlitků jsou uvedeny v tab. 5.1.

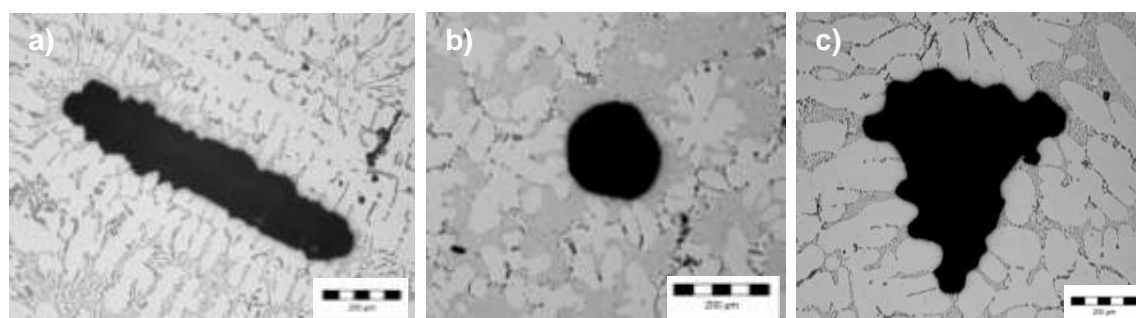
Tab. 5.1 Nejčastější vnitřní vady u odlitků č. 1 - 6

Číslo vzorku (odlitku)	Nejčastější vnitřní vady
1	Porezita, $\beta$ ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze, přemodifikovaná struktura.
2	Porezita, $\beta$ ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze, nemodifikovaná struktura, oxidické blány.
3	Porezita, $\beta$ ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ).
4	Porezita, $\beta$ ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ).
5	Porezita, $\beta$ ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ).
6	Porezita, $\beta$ ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ), primární Si

### 5.1 Stručný popis nejčastěji se vyskytujících vad

#### 5.1.1 Pórovitost

Pórovitost, (často nazývaná porezita) jako slévárenská vada, vzniká během tuhnutí, kdy se rozpustnost vodíku prudce snižuje. Porezita bývá způsobena kombinací tvorby mikrostaženin a bublin. O čistých plynových bublinách a o čistých mikrostaženinách můžeme hovořit jen zřídka. V případě, kdy převažuje mechanismus vzniku bublin, mají póry více kulovitý tvar, pokud převažuje mechanismus mikrostaženin, jsou dutiny tvarově členité a kopírují dendritickou stavbu kovu viz obr. 5.1. [2]



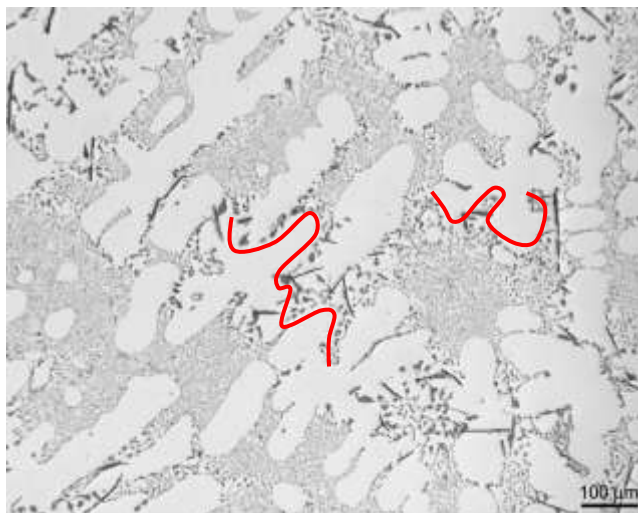
Obr. 5.1 Tvary pórů ve slitinách hliníku: a) mikrostaženina; b) plynová bublina; c) porezita (plyn a mikrostaženina)

#### 5.1.2 Fáze $\beta$ ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ )

Fáze  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) označována jako jehlicovitá fáze je intermetalická sloučenina, kterou tvoří již malé množství Fe ve slitinách Al. Tato fáze vzniká v rozmezí intervalu tuhnutí při teplotách kolem 580 °C, tj. před vyloučením lamel Si. Má monoklinickou mřížku a tvoří hrubé deskovité útvary (na výbrusu viditelné jako jehlice), které porušují strukturu siluminu a výrazně zhoršují jeho vlastnosti. [2]

### 5.1.3 Přemodifikovaná struktura

Přemodifikovaná slitina viz obr. 5.2 může vzniknout při překročení optimálního obsahu modifikačního prvku. Přemodifikovaná struktura viditelná na obr. 5.2 je typická výskytem hrubých útvarů Si na hranici zrn. V důsledku odměšení přebytečného Na vzniká na hranici zrn intermetalická fáze  $AlSiNa$ , která slouží jako krystalizační zárodky pro částice zrnitého Si. [2]



Obr. 5.2 Přemodifikovaná struktura Al-Si-Mg, zv. 100 x



## 6 ROZBOR VÝROBY JEDNOTLIVÝCH ODLITKŮ

### 6.1 Formovací směs

Na výrobu již zmíněných odlitků (č. 1 - 6) v této diplomové práci byla použita jednotná bentonitová formovací směs, přičemž základní složení směsi bylo ostřivo, pojivo a voda. Ve společnosti se jako pojivo používá bentonit společnosti KERAMOST – SABENIL 65 (tab. 6.1). Používaným ostřivem je STŘELEČ ST 53 ( $d_{50} = 0,27 \text{ mm}$ ) s vlastnostmi viz tab. 6.2.



Obr. 6.1 Bentonit SABENIL 65

Tab. 6.1 Vlastnosti pojiva bentonit SABENIL 65 [6]

Vlastnosti bentonitu SABENIL 65	
Skupenství při 20 °C	pevné
Barva	Šedá, šedobílá, béžová, zelenomodrá
Zápach	Bez zápachu
Hodnota pH / při °C	9 – 11 / 20 °C
Bod vzplanutí °C	nehořlavý

Tab. 6.2 Vlastnosti ostřiva STŘELEČ ST 53 [7]

Vlastnosti ostřiva STŘELEČ ST 53	
Velikost středního zrna ( $d_{50}$ )	0,27 mm
Bod tání	1780 °C
Hustota	2,65 g/ml
Ztráta žíháním	0,23 %
Sintrace (spékavost)	1560 °C
Vlhkost v mokřém a sušeném stavu	8,0 max a 0,2 max

Odlitky č. 1 – 6 byly odlévány do jednotných bentonitových formovacích směsí, skládajících se z výše jmenovaných složek.

#### 6.1.1 Příprava a doprava formovací směsi

Formovací směs je vyráběna na kolovém mísiči MK 500, kde dochází k homogenizaci směsi a obalení každého zrna ostřiva pojivem (bentonit). Probíhá mísení vratné směsi a následné ožiování bentonitem (maximálně 3 % na 500 kg směsi) tak, aby se konečný obsah bentonitu ve směsi pohyboval kolem 6 – 7 %. Ožiování je důležité z hlediska ztráty aktivity bentonitu při předchozím odlévání. Během tuhnutí odlitku dochází k tepelnému znehodnocení bentonitu, jehož aktivita se ztrácí spálením bentonitu (pasivní bentonit) v těsné blízkosti tuhnoucího kovu a lze ho považovat pouze za prachový podíl. Další ztráta aktivního bentonitu nastává při přesypech a vytloutání odlitků v systému odsávání.

Mísení směsi trvá přibližně 4 – 5 minut, následně je směs vypuštěna na dopravník umístěný pod mísičem a postupuje elevátorem na transportní pásy zvlášť do násypky formovacích strojů a zvlášť na hromady pro ruční formování.

## 6.2 Technologie výroby forem

### 6.2.1 Strojní formování

Strojní formovna společnosti používá dva páry formovacích strojů FOROMAT 20 pracující s jednotnou bentonitovou směsí dávkovanou ze zásobníku stroje pro rozměry ráků 350x450x100/120 mm, 400x450x100 mm, 500x500x120/120 mm a 400x600x120/120 mm. Modelová směs je nahrazována ručním přesátím jednotné směsi na model, poté je zbytkový prostor ráku vyplněn se stejným přebytkem jednotnou směsí. Následuje střešení a dolisování. Dalším důležitým krokem je pečlivé vyfoukání zbytků směsi. Hotová poloforma se otočí o 180° a je uložena na vozíčkový dopravník. Do spodní poloformy jsou případně založena jádra a filtry. Do horní poloformy je zalisována vtoková jamka, kterou je nutné ručně vyjmout, začistit vtok a pečlivě poloformu vyfoukat. Hotová poloforma je zavedena na spodní poloformu, která je již připravena na vozíčkovém dopravníku. Před odléváním je forma zatížena.

Jeden oběh dopravníku (obr. 6.2) běžícího na plný výkon trvá zhruba 2 hodiny, čímž je zajištěno dokonalé zchlazení kovu, a proto vady, které by mohly vzniknout důsledkem předčasného vytloukání odlitků v tomto případě nepřipadají v úvahu.



Obr. 6.2 Strojní formování a doprava forem

### 6.2.2 Ruční formování

Ruční formovna je ve společnosti rozdělena na čtyři pracoviště, každé s vlastní hromadou formovací směsi. Jsou zde vyráběny formy zejména pro velké odlitky do ráků o velikosti od 850 x 850 x 200 mm. Formování provádí pracovníci většinou ruční pneumatickou pěchovačkou a sestavené formy jsou následně přemisťovány dvěma mostovými jeřáby.

Ručně formované jsou rozměrnější odlitky číslo 1 a 2.



## 6.3 Technologie výroby jader

### 6.3.1 Jaderna pro slévárnu neželezných kovů

Slévárna neželezných kovů používá jádra ze tří pracovišť:

- Malá jaderna napojena přímo na pracoviště slévárny neželezných kovů, vyrábějící jádra z akrylátové směsi vytvrzované  $\text{CO}_2$ . Jsou zde 3 možnosti výroby jader, a to buď vstřelením, nebo pēchováním pneumatickou, či ruční pēchovačkou. V době výroby vybraných odlitků převládala jádra zhotovená z akrylátové směsi, zatímco v poslední době se začalo využívat vzhledem k lepším užitným vlastnostem (prodyšnost, pevnost a rozpadavost) geopolymerního pojiva obr. 6.3. Kromě těchto vlastností geopolymery nemají tak nepříznivé účinky na kvalitu jednotné bentonitové směsi jako jádra akrylátová.



Obr. 6.3 Geopolymerní jádro pro odlitek č. 3

- Jaderna slévárny litin vyrábějící jádra menších rozměrů. Tato jádra jsou vyráběna metodou Cold Box – amin vstřelována na stroji Laempe viz obr. 6.4 (10 litrů/jeden vstřel). Vyznačují se výbornými vlastnostmi, zejména rozpadavostí. Mohou být ponechána v bentonitových směsích a následně nemusí být separována od této směsi, jelikož mohou nadále fungovat jako oživovací ostřivo.



Obr. 6.4 Vstřelovačka Laempe

- Velká jaderna ve slévárně neželezných kovů pro výrobu rozměrnějších jader pro odlitky odlévané do forem ručně formované. Tato jádra jsou z geopolymerního pojiva - Rudal A. Směs je vyráběna na průběžném jednoramenném mísiči Wöhr.

## 6.4 Příprava a úprava taveniny

### 6.4.1 Tavírna

V tavírně společnosti se používají plynové kelímkové pece typu MORGAN na zemní plyn. Jsou instalovány 2 pece s kelímky na 750 kg taveniny (obr. 6.5), 2 pece na 600 kg taveniny a 3 menší pece na 100 kg taveniny. Tavenina je bohužel ošetřována přímo v tavících pecích, protože jako transportní pánve pro přesun taveniny se používají grafitové kelímky (obr. 6.12) přepravují malé množství kovu (obvykle do 100 kg) a z toho důvodu mimopecní zpracování v těchto podmínkách není proveditelné. Ošetření taveniny v kelímku tavící pece navíc významně snižuje životnost a tím prodražuje výrobu taveniny.



Obr. 6.5 Plynové kelímkové pece – 750 kg

Pec je vyzděna žárobetonem tak, aby mezi vkládaným SiC kelímkem a vyzdívkou byla mezera cca 7 cm. Víko pece je vyzděno rovněž žárobetonem.

Pro přípravu taveniny odlitků č. 1 – 6 byla použita tavící pec na 600 kg taveniny.

### 6.4.2 Tavení

Využití kovu ve slévárně neželezných slitin je okolo 50% což je důležité uvažovat při návrhu vsázkových materiálů. Na dno pece se nejdříve umísťuje drobnější vratný materiál (vtoky, nálitky, případně neshodné odlitky), poté je vložena surovina v houskách, která je nejvyšším vsázkovým materiálem s atestovaným chemickým složením, minimálním obsahem nečistot a rozpuštěných plynů. Množství housek je obvykle polovina hmotnosti budoucí taveniny. Je nutné, aby vkládané housky byly zbaveny vlhkosti (obr. 6.7), jelikož mohou být významným zdrojem vodíku a oxidických vměstků v tavenině, proto je nutné důkladné vysušení vsázky. V této slévárně se používají tři druhy housek od různých dodavatelů, jejichž použití je řízeno nároky na kvalitu budoucích odlitků podle atestů, nebo podle zkušeností s vyřazováním neshodné produkce. Zbytková část taveniny je doplněna opět vratným materiálem (obr. 6.6).



Obr. 6.7 Skladování housek



Obr. 6.6 Vratný materiál vkládaný do pece

Teplota taveniny v peci je vždy před odpichem kontrolována ponornými pyrometry (Termosondy Kladno) s nasouvací koncovkou (kartuší) viz obr. 6.8. Kartuše má při šetrném zacházení životnost až 20 měření. Po natavení a ošetření je tavenina přelita do transportního kelímku a na pracovišti odlévání zkontrolováno, zda teplota odpovídá předepsané teplotě lité.



Obr. 6.8 Termosondy Kladno

### 6.4.3 Ošetřování taveniny

#### Modifikace

Ve slévárně se jako modifikátor používá sodík ve formě exotermických tablet s označením SIMODAL 97 – Foseco (obr. 6.9). Tablety jsou vysušovány na vyhřívané desce (45 – 50 °C) většinou celou předchozí směnu (8 hodin) a cca 20 minut před vhozením do taveniny jsou předeřhřívány uložením na okraj víka tavicí pece, aby bylo zapříčiněno možnému vniknutí vlhkosti společně s tabletou do taveniny. Dávkování při liti do pískových forem je obvykle 0,1 – 0,2 %.

Při úpravě taveniny odlitků č. 1 – 6 bylo pro každou tavbu použito 5 modifikačních tablet SIMODAL 97.



Obr. 6.9 Modifikační tableta SIMODAL 97

#### Očkování

Ve společnosti se jako očkovadlo používá předslitina v podobě tyček (obr. 6.10), potřebné množství očkovadla je taviči zadáno počtem tyček na danou hmotnost tavby. Množství předslitiny přidávané do taveniny je závislé na obsahu křemíku (čím více křemíku ve slitině, tím větší množství přidávané předslitiny). Účinek dané předslitiny je téměř okamžitý, avšak u některých slitin po překročení doby zhruba 30 minut může docházet ke zhoršení zjemňujícího účinku. Očkovací teplota je obvykle stejná jako teplota odlévání dané slitiny.



Obr. 6.10 Očkovací předslitina AlTi5B1

## Odplyňování

Je důležité uvažovat možnou spojitost mezi naplyněním a stahováním taveniny, protože plynové póry mohou částečně nebo úplně nahrazovat úbytek objemu kovu stahováním při tuhnutí. To může u silně odplyněné taveniny způsobit velký sklon k tvorbě mezidendritické porezity soustředěných staženin, a proto je nutné dokonalé nálitkování. [2]

Ve společnosti se používá odplyňování tabletami na principu postupného uvolňování dusíku ECOSAL – Al 320 (obr. 6.11) přímo v tavící peci (vhodnější je mimopecní zpracování taveniny nebo dokonce odplyňování pomocí FDU zařízení). Tablety jsou do taveniny vpraveny děrovaným zvonem těsně nad dno kelímku. Volba otvorů ve zvonu musí být volena tak, aby nanesením ochranného povlaku nedošlo k jejich ucpání, ale zároveň aby unikající bubliny dusíku měly co nejmenší možný poloměr z hlediska rychlosti vyplouvání podle Stokesova zákona (6.1). Malá velikost bublin, dostatečně dlouhá dráha (tzn. jejich tvoření u dna dostatečně vysoké pánve) a dobré promíchávání (homogenizace) taveniny, jsou klíčovou podmínkou účinného odplynění. Během vyplouvání je vodík těmito bublinami pohlcován do vzniku rovnováhy mezi parciálním tlakem vodíku v bublině a v lázni a následně vynášen na hladinu. [2]



Obr. 6.11 Odplyňovací tablety ECOSAL – Al 320

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{g \cdot (\rho_{\text{kovu}} - \rho_{\text{plynu}})}{\eta} \cdot r^2 \quad (6.1) [2]$$

$\rho$ ...hustota kovu, resp. plynu ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$\eta$ ...dynamická viskozita ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )

$r$ ...poloměr bubliny (m)

Pro odplynění taveniny použité pro odlitky č. 1 – 6 v 600 kg peci bylo použito 6 tablet ECOSAL – Al 320.



#### 6.4.4 Transport taveniny

Pro transport taveniny se používají 3 trasy, a to podle toho, zda je tavenina přesouvána na strojní pracoviště nebo do kokilárny. Přesun na strojní pracoviště je umožněn podvěsnou drážkou využitou přímo k odlévání. Do kokilárny je tavenina přesouvána na druhém rameni podvěsné drážky navazující na podvěsnou drážku spojenou s jeřábem. Z jeřábu jsou doplňovány udržovací pece kokilárny. Třetí trasa slouží k transportu taveniny na ruční pracoviště. Větší objemy taveniny jsou přemísťovány pomocí jeřábu ruční formovny.

Tavenina pro odlitky č. 1 a 2 byla přesouvána na ruční pracoviště a pro odlitky č. 3 – 6 na pracoviště strojní.



Obr. 6.12 Transport taveniny na podvěsné drážce

#### 6.5 Vytluokání a čištění odlitků

Po odlití a ztuhnutí kovu jsou formy přemístěny do prostoru vytluokání, kde dochází na stabilním vytluokacím roštu k oddělení surového odlitku od formovací směsi. Surový odlitek je odlitek včetně vtoků a nálitků. Pokud jsou přítomna jádra, odlitky jsou přesouvány do čistírny na pracoviště vytluokání jader. Dále na čistírně dochází k odstranění vtokové soustavy a nálitků, což je prováděno pásovými pilami. Následuje dobrušování povrchů odlitků zejména v místech zvýšené hrubosti povrchu. Je důležité si uvědomit poměrně vysokou pracnost tohoto kroku, proto je vhodné se této činnosti maximálně vyvarovat návrhem správné technologie. Většina odlitků je dále čištěna v komorovém tryskači, kde dochází k odstraňování nežádoucích povrchových vrstev vrháním tryskacího prostředku na povrch odlitku velkými rychlostmi.

Již na čistírně dochází k vyřazení některých neshodných odlitků s viditelně nepřipustnými vadami. Další odlitky se zjevnými povrchovými vadami jsou vyřazovány po otryskání a o jejich dalším možném opracování rozhodne kontrolorka. Nevhodné odlitky jsou zařazeny do vratného materiálu a některé odlitky s přípustnými vadami jsou přesunuty na pracoviště oprav. Opravy se provádějí zejména zavařováním. Tepelně nezpracované siluminy jsou zavařovány elektrodami na bázi hliníku s křemíkem, zatímco tepelně zpracované elektrodami na bázi hliníku s hořčíkem bez přítomnosti křemíku. Odlitky jsou dále přesouvány na expedici.

## 6.6 Kontroly procesů používané ve společnosti

### 6.6.1 Zkoušení formovacích směsí

Laboratorní zkoušky formovacích směsí jsou prováděny během směny v pískové laboratoři. U odebraného vzorku se ověřuje prodyšnost, pevnost v tlaku a vlhkost formovací směsi vysoušením navážky pod infralampou.

#### Prodyšnost formovací směsi

Prodyšnost je stanovována analogovým přístrojem LPIR – 1 na měření prodyšnosti (obr. 6.13) pomocí válcového vzorku, připraveného laboratorním pěchovadlem O22 SP – PO obr. 6.14.



Obr. 6.13 Analogový přístroj pro měření prodyšnosti formovací směsi



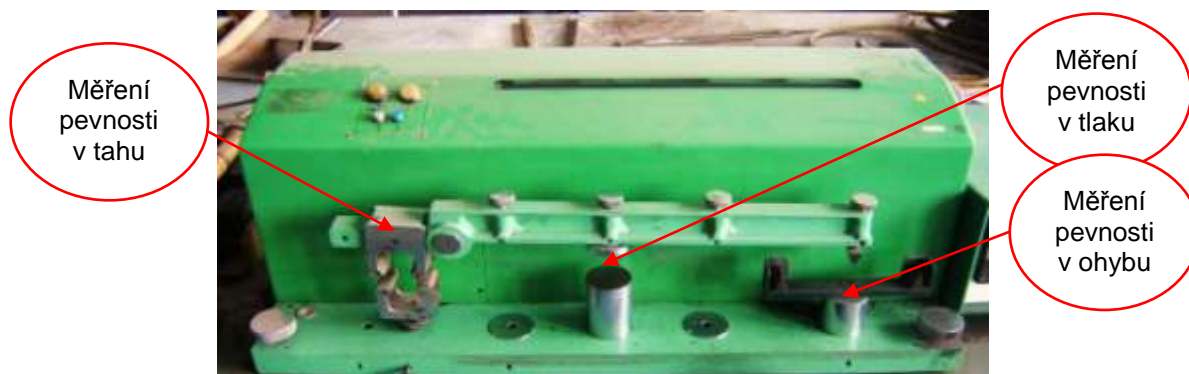
Obr. 6.14 Laboratorní pěchovadlo

Záznamy údajů prodyšnosti odebíraných v daných týdnech odlévání jednotlivých odlitků jsou uvedeny v příloze č. 2. Jelikož nebylo možné dohledat konkrétní hodnoty prodyšnosti formovací směsi použité k výrobě daného odlitku, byl vypočítán aritmetický průměr prodyšnosti z jednotlivých týdnů výroby s ohledem na ruční nebo strojní formování.

#### Pevnost formovací směsi v tlaku

Pevnost v tlaku je stanovována analogovým přístrojem LRU na měření pevnosti v tlaku (případně pevnosti směsi ve štěpu), v ohybu a v tahu. Vzorek pro měření pevnosti v tlaku je vyroben laboratorním pěchovadlem. Vzorky na měření pevnosti v ohybu a v tahu (používá se omezeně) jsou vyráběny do normalizovaných jaderníků. Pevnost v ohybu se používá na jádrové směsi.





Obr. 6.15 Přístroj na měření pevnosti v tlaku, ve štěpu, ohybu a tahu formovací směsi

Záznamy údajů pevnosti formovací směsi v tlaku naměřené v daných týdnech odlévání jednotlivých odlitků jsou uvedeny v příloze č. 3. Jelikož nebylo možné dohledat konkrétní hodnoty pevnosti formovací směsi v tlaku použité k výrobě daného odlitku, byl vypočítán aritmetický průměr pevnosti z jednotlivých týdnů výroby s ohledem na ruční nebo strojní formování.

### Vlhkost formovací směsi

Vlhkost formovací směsi se stanovuje z navážky (400 g) odebrané směsi z násypek u formovacích strojů a ze čtyř pracovišť ruční formovny, odhrnutím vrchní vrstvy směsi a ručním odebráním navážky v hloubce zhruba 20 cm pod povrchem směsi. Navážka se vysuší pod infralampou poprvé po dobu pěti minut, opakovaně se znovu suší po dvou minutách dokud nejsou dvě po sobě jdoucí hmotnosti naprosto stejné. Z těchto hmotností je spočtena výsledná vlhkost směsi.

Záznamy vlhkostí formovací směsi jsou opět uvedené v příloze č. 4. A opět byl vypočítán aritmetický průměr vlhkosti z jednotlivých týdnů výroby s ohledem na ruční nebo strojní formování.



Obr. 6.16 Sušení směsi pod infralampou

Aritmetické průměry naměřených vlastností jednotlivých formovacích směsí pro dané odlitky jsou uvedeny v tab. 6.3.

Tab. 6.3 Průměrné hodnoty vlastností formovacích směsí

Číslo odlitku	Prodyšnost směsi [n.j.p]	Pevnost směsi v tlaku [Pa]	Vlhkost směsi [%]
1	129	1506	3,9
2	138	1490	3,8
3	120	1747	3,2
4	134	1673	3,0
5	142	1665	3,6
6	135	1563	3,3

### Množství vyplavitelných látek

V laboratoři Odboru slévárenství – VUT FSI Brno bylo provedeno měření vyplavitelných látek.

Vyplavitelné látky, tj. podíly menší než 0,02 mm, se stanoví normovaným způsobem plavení a sedimentací za využití Stokesova zákona. Při zkoušce se neusazené jemné podíly, uvolněné varem vzorku ve vodě s přísadou hydroxidu sodného a následujícím mícháním vysokoobrátkovým míchadlem odsávají v pravidelných intervalech spolu se sloupcem vody nad vrstvou usazených zrn písku. [8]

Bylo postupováno dle Rusína [8]. Do kádinky o obsahu 600 ml nejprve bylo naváženo 50 g vysušeného a ochlazeného písku, poté bylo přidáno 250 ml vody a 10 ml 1% hydroxidu sodného. Obsah kádinky se nechal přejít varem zhruba 3 - 4 min a poté se míchal vrtulovým míchadlem 10 min. Následně byly vrtulky nad kádinkou opláchnuty tak, aby byl případný přichycený písek spláchnut zpět do kádinky. Voda se doplní zhruba 2 cm pod okraj kádinky a po uplynutí 10 minut se stáhla pomocí speciální násosky viz obr. 6.17. Opět se přidalo 10 ml 1% hydroxidu sodného a byla doplněna voda, která se po 10 min opět stáhla násoskou.

Následovalo stahování násoskou vždy po 5 minutách do doby, než bylo dosaženo čirého sloupce vody. Po posledním stažení byl písek vysušen, zchladnut a zvážen. Obsah vyplavitelných látek je dán váhovým rozdílem před a po vyplavování.



Obr. 6.17 Odsátí speciální vody násoskou



Obr. 6.18 Odstátí písku ve vodě

Dle vzorce (6.2) byl vypočítán obsah vyplavitelných látek v % [8]:

$m_s$  – hmotnost vysušeného písku před plavením = 50g  
 $m_o$  – hmotnost vysušeného písku po plavení = 49,95 g

$$\% = \frac{m_s - m_o}{m_s} \cdot 100 = \frac{50g - 49,95g}{50g} \cdot 100 = 0,1\% \quad (6.2)$$

## Sítový rozbor

K sítovému rozboru byl použit vzorek po vyplavení vyplavitelných látek. Vysušený vzorek se vysypal na horní síto sady zkušebních sít a nechal se prosívat 10 minut na přístroji (obr. 6.19). Poté byly jednotlivé frakce na sítích zváženy viz tab. 6.4 .

Tab. 6.4 Tabulka hodnot vážených na jednotlivých sítích

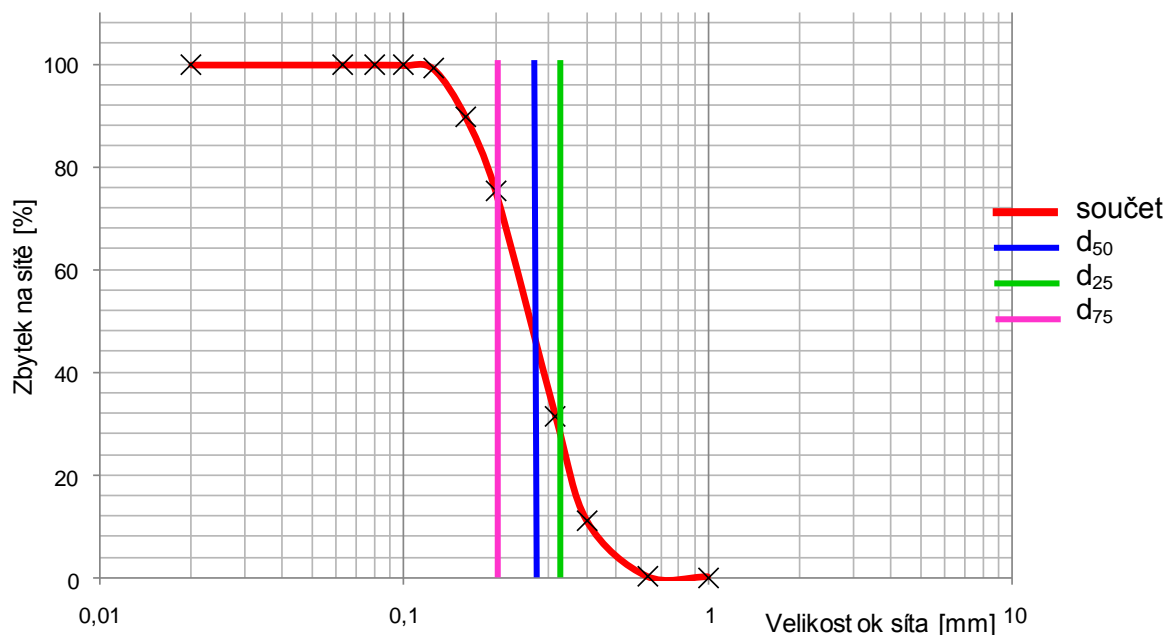
Síta mm	zbytek		součet %
	g	%	
1,000	0,00	0,0	0,0
0,630	0,07	0,1	0,1
0,400	5,39	10,8	10,9
0,315	10,29	20,6	31,5
0,200	21,94	43,9	75,4
0,160	7,08	14,2	89,6
0,125	4,74	9,5	99,1
0,100	0,36	0,7	99,8
0,080	0,04	0,1	99,9
0,063	0,02	0,0	99,9
0,020	0,00	0,0	99,9
<b>Celkem</b>	49,98	100	



Obr. 6.19 Přístroj použitý pro prosívání písku

Zrnitost písku se vyjadřuje graficky součtovou křivkou zrnitosti v jednotném semilogaritmickém rastru s logaritmickou stupnicí pro velikost ok sít na ose vodorovné a dekadickou na ose svislé pro % podílů písku zachyceného na sítích. Tato křivka určuje spojitě procentový obsah zrn jako funkce jejich velikosti. [8]

Ze součtové křivky zrnitosti se odečte velikost středního zrna ostřiva  $d_{50}$  v mm a hodnoty velikosti zrn  $d_{25}$  a  $d_{75}$ , v patě souřadnice pro 25 %, 50 %, 75 % množství ostřiva.



Obr. 6.20 Sítový rozbor ostřiva

Tab. 6.5 Další zjištěné vlastnosti ostřiva STŘELEČ

$\rho_s$ Sypná obj. hmotnost ostřiva g/cm <sup>3</sup>	-
$S_{th}$ teoretický povrch cm <sup>2</sup> /g	91,01
$MK_{falc}$ střední velikost zrn mm	0,278
AFS	51,9
$d_{50}$ mm	0,267
$d_{75}$ mm	0,201
$d_{25}$ mm	0,342
pravidelnost zrnitosti ostřiva $d_{25}/d_{75}$ %	58,8
log w	64,3
log w %	61,8
podíly ostřiva pod 0,1 mm %	0,12
$n_{th}$ teoretický specifický počet zrn ks/g	71339,17
$S_w$ specifický měrný povrch cm <sup>2</sup> /g	nedef.
$K_h$ koeficient hranatosti $S_w/S_{th}$	nedef.

Vzhledem k výsledkům vlastností formovacích směsí a v souvislosti s provedenými nápravnými opatřeními před odlitím vybraných vzorků odlitků lze považovat vliv formovacích látek na vnitřní neshodnou produkci za zanedbatelný.

### 6.6.2 Kontrola taveniny

#### Měření stupně naplynění

Měření stupně naplynění je prováděno na zařízení viz obr. 6.21 pracující na principu měření dichte indexu. Zvon je celokovový ve spodní části opatřen gumovým těsněním. Samotné měření začíná odlitím dvou vzorků do kelímků, jeden tuhne za atmosférického tlaku, zatímco druhý za podtlaku. Ihned po odlití vzorku se kelímek zakryje připraveným zvonem a zmáčkne se tlačítko, přičemž dochází k vytváření podtlaku nastaveném na manometru což je 80 mbar (8 kPa) po celou dobu tuhnutí. Nevýhodou tohoto měřicího zařízení spočívá v ručním ovládání, přičemž záleží na tom, jak rychle je přiklopen zvon a sepnut spínač, což by mělo trvat maximálně 2 sekundy, ovšem toto je splněno málokdy, proto je toto měření velmi subjektivní významně ovlivněné lidským faktorem.



Obr. 6.21 Měřicí zařízení stupně naplynění používané ve společnosti

Při vyhodnocování stupně naplynění současným způsobem je nutné zpracování vzorku: přenesení do laboratoře, rozříznutí, vybroušení obou řezů a konečné vyhodnocení makrostruktury dle obr. 6.22 a tvaru ztuhlé hladiny vzorku. Tyto úkony jsou časově náročné, a vzhledem k pracnosti lze uvažovat možné nedodržování pracovního postupu, a proto bylo rozhodnuto, že se v blízké době zakoupí dichte index fungující podobným způsobem s rozdílem v rychlosti uzavření a spuštění vývěvy při jednom pohybu ruky, což znamená, že při tomto měření je lépe vyloučen lidský faktor.



Obr. 6.22 Etalony pro porovnávání stupně naplynění taveniny

V případě že se na vzorku tuhnoucím za sníženého tlaku vytvoří porezita menší, než je na ideálním etalonu (obr. 6.22) tavenina je považována za dostatečně odplyněnou a je uvolněna k lití. Pokud je porezity příliš mnoho, znamená to, že odplynění neproběhlo tak jak mělo, a do dané taveniny je opět vhozena odplyňovací tableta a po odplynění je provedeno další měření naplynění. Pokud druhé měření je v pořádku, tavenina je uvolněna k lití, ale jestliže i druhé měření ukazuje velkou porezitu je nutné danou tavbu naředit.

Ke stanovení obsahu plynů v tavenině je ideální po odlití těchto dvou vzorků na vzduchu a za podtlaku provést tzv. dvojí vážení (každý vzorek je zvážen na vzduchu a ve vodě), k čemuž jsou zapotřebí přesné váhy, které si společnost obstarala teprve v únoru roku 2010 (obr. 6.23). Tyto váhy po zvážení obou vzorků na displeji vyhodnotí konečnou hodnotu dichte indexu. Dříve tato metoda byla prováděna v odměrném válci přičemž bylo zapotřebí množství plynů vypočítat dle metodiky viz níže, což bylo velmi pracné.



Obr. 6.23 Profesionální váhy pro metodu dvojího vážení

Metodika používaná pro stanovování obsahu plynů v tavenině: [9]

Pro Dichte index (index hustoty) DI platí :

$$DI = \frac{\rho_R - \rho_V}{\rho_R} \cdot 100 \quad [\%], \quad \text{kde:} \quad (6.3)$$

$$\rho_R = \frac{m_{RAT}}{m_{RAT} - m_{RVO}} \cdot \rho_{VODY}, \quad (6.4)$$

$$\rho_V = \frac{m_{VAT}}{m_{VAT} - m_{VVO}} \cdot \rho_{VODY} \quad (6.5)$$



Určení hmotnosti a objemu obou vzorků zvážením na vzduchu a ve vodě :

$\rho_R$ .....hustota vzorku ztuhlého za atmosférického tlaku

$\rho_V$ .....hustota vzorku ztuhlého ve vakuu 80 mbar (8kPa)

$\rho_{VODY}$ ..hustota vody = 1

Při vážení zjištěno dále:

$m_{RAT}$ ..hmotnost vzorku R, váženého v atmosféře[g]

$m_{RVO}$ ..hmotnost vzorku R, váženého ve vodě [g]

$m_{VAT}$ ..hmotnost vzorku V, váženého v atmosféře[g]

$m_{VVO}$ ..hmotnost vzorku V, váženého ve vodě [g]

### Kontrola chemického složení

Kontrola chemického složení je ve společnosti prováděna pomocí kvantometru SPECTRUMAT 400 T/GL (obr. 6.24) s doutnavým výbojem a optikou 400 mm (vzdálenost mezi stínítkem a zdrojem světla). Někdy se používá i provozní kvantometr FOUNDRY – MASTER.

Okamžitě po natavení vsázky se odebere první vzorek (obr. 6.26) (odlitý do kokilky viz obr. 6.25), ověří se chemické složení na kvantometru SPECTRUMAT, což by mělo být vykonáno mezi ošetřením taveniny, přičemž musí být provedeno ofrézování a obroušení testované plochy. Na tyto operace přípravy vzorku má metalurg zhruba 15 – 20 minut, což je málokdy splněno a dokonce se stává, že označené vzorky jsou analyzovány dávno po odlití, což v tomto případě znamená nebezpečí odlití značného počtu neshodných odlitků.



Obr. 6.24 Kvantometr SPECTRUMAT 400 T/GL



Obr. 6.25 Kokilka používaná pro odlévání vzorků



Obr. 6.26 Odlitý vzorek



Provozní kvantometr FOUNDRY – MASTER se používá v případě podezření na možné neshodné odlitky vyrobeného sortimentu. Výhodou je že u tohoto přístroje je možné analyzovat odlitky do hmotnosti zhruba 10 kg tzn., že se obrousí pouze vyšetřovaná část a odlitek je umístěn na horní plochu kvantometru. Tento přístroj je používán hlavně pro slévárnu litiny, což je jistou nevýhodou v případě hodnocení hliníkové slitiny, jelikož se v jiskřícím prostoru mohou vyskytovat zbytkové obsahy částeczek materiálu z předchozí analýzy z důvodu nedokonalého proplachu komory inertním plynem, a proto se po analyzování litiny doporučuje provést tři tzv. výplachové analýzy.



Obr. 6.27 Provozní kvantometr FOUNDRY MASTER

### Vyhodnocení chemického složení

Chemické složení vybraných odlitků bylo stanoveno na odebraných broušených vzorcích pomocí kvantometru SPECTRUMAT 400 T/GL z aritmetického průměru tří měření a následně porovnáno s předpisem chemického složení dle normy EN 1706 viz tab. 6.6 a tab. 6.7. Průměrné hodnoty ze tří měření každého vzorku jsou uvedeny v tab. 6.8. Detailní hodnoty jednotlivých fází chemického složení jsou uvedeny v příloze č. 5.

Tab. 6.6 Chemické složení slévárenské slitiny Al (AC-AISi10Mg(a)/ AC-43000/ 424331) podle EN 1706 [10]

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni
hm. %	9 - 11	0,55	0,05	0,45	0,2 - 0,45	-	0,05
Prvek	Zn	Pb	Sn	Ti	Jiné celkem		Al
hm. %	0,1	0,05	0,05	0,15	0,15		zbytek

Tab. 6.7 Chemické složení slévárenské slitin Al (AC-AISi7Mg0,3/ AC-42100/ 424334) podle EN 1706 [10]

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni
hm. %	6,5 - 7,5	0,19	0,05	0,1	0,25 - 0,45	-	-
Prvek	Zn	Pb	Sn	Ti	Jiné celkem		Al
hm. %	0,07	-	-	0,08 - 0,25	0,1		zbytek

Tab. 6.8 Aritmetické průměry chemického složení jednotlivých vzorků

Číslo odlitku	Al	Si	Mn	Mg	Cu	Fe	Ni	Ti	Zn	Ca
1	84,50	9,76	0,07	0,33	0,024	0,393	0,014	0,081	0,016	0,003
2	86,09	10,43	0,15	0,22	0,026	0,481	0,016	0,093	0,008	0,002
3	83,60	10,56	0,17	0,39	0,036	0,519	0,014	0,089	0,020	0,005
4	82,07	8,90	0,16	0,33	0,017	0,507	0,013	0,073	0,027	0,003
5	87,33	8,09	0,05	0,32	0,051	0,189	0,017	0,148	0,007	0,002
6	85,75	7,00	0,05	0,33	0,024	0,128	0,022	0,151	0,059	0,002



Dle tab. 6.8 jsou u odlitků č. 2, 3, 4 a 5 celkem vysoké obsahy Fe, což je nepříznivé z hlediska tvorby  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází, které mohou být příčinou nedokonalého doplňování taveniny s následným vznikem porezity. Příčinou porezity může být také příliš nízký obsah Mn, protože dle Roučky [2] je doporučován obsah Mn přibližně  $\frac{1}{2}$  obsahu Fe proto, aby nepříznivé  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze byly nahrazeny vhodnější  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ ) fází. Toto doporučení nebylo dosaženo ani u jednoho odlitku, proto by bylo vhodné se tomuto problému nadále věnovat (viz kapitola č. 8).

## 6.7 Návrh doporučení ke zlepšení kvality taveniny během výrobního procesu

Při detailním rozboru a sledování výroby odlitků ve společnosti byly nalezeny kroky, které by měly být upraveny, jelikož mohou mít významný vliv na vznik vnitřních vad uvedených v kapitole č. 5. Jedná se hlavně o:

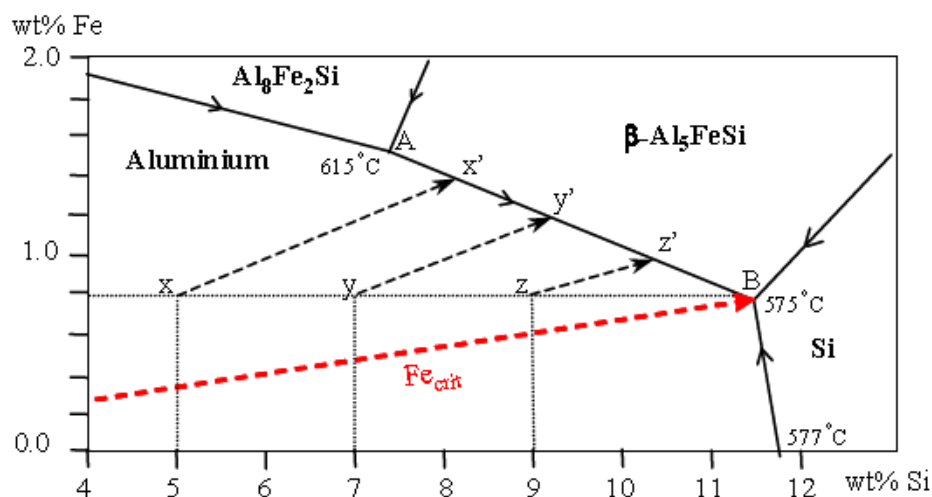
- časté přehřívání taveniny nad teplotu i 800 °C, což významně zvyšuje rozpustnost vodíku v tavenině a tím dochází ke vzrůstu obsahu plynů v tavenině.
- dávkování modifikačních přípravků, což nebylo zjištěno během procesu, ale po kontrole metalografických výbrusů (kapitola č. 3). Na některých výbrusech nebyla patrná modifikovaná struktura eutektika, někdy byla struktura dokonce přemodifikovaná.
- odplynování taveniny ponorným zvonem, což je považováno za nevhodné, protože může docházet k tvorbě příliš velkých bublin plynu a nedostatečnému míchání taveniny, což by mělo být nahrazeno modernějším způsobem odplynování, např. zařízením FDU.
- stávající provádění kontroly naplynění bez průběžného zaznamenávání hodnot do databáze slévárny. Toto zařízení by mělo být nahrazeno objektivnějším a přesnějším měřením zařízením k tomu určenému.
- složení vsázkových surovin ve spojitosti s dosažením obsahu Mn alespoň polovičního obsahu Fe.

## 7 VLIV Fe A Mn NA POREZITU U Al - Si SLITIN

Při tuhnutí taveniny Al-Si slitin je nutný neustálý přísun taveniny do nejpozději tuhoucích míst. Kritický přísun taveniny je nejčastěji do nejpozději tuhoucích mezidendritických prostor což je často příčinou vzniku porezity. U Al - Si slitin je další přítěží přísunu taveniny tvorba intermetalických fází před nebo po eutektické reakci. [11]

Velké problémy s porezitou jsou zejména u Al-Si slitin s výskytem Fe. Přičemž Fe je známo svým nepříznivým vlivem na mechanické vlastnosti slitin. S přítomností Fe ve slitinách Al-Si souvisí vznik  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází tzv. jehlic, které blokují přísun taveniny do mezidendritických prostor. Se stoupajícím obsahem Fe byla zjištěna větší přítomnost porezity, přičemž od určitého obsahu Fe jsou pozorovány rozsáhlé oblasti s tzv. "pěnovou porezitou". V tom případě se jedná o oblasti se vzájemně propojenými póry. Tento typ porezity se vyskytuje zejména při překročení kritického obsahu Fe, čímž dojde k vyloučení  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází. Tyto fáze se vytvoří nejprve uvnitř dendritické sítě, následně dojde k vyloučení Al-Si eutektika ve tvaru eutektických zrn, které mohou vyrůstat na fázích s Fe. Tímto je výrazně snížena propustnost tuhoucích fází a výsledkem je vznik vzájemně propojených pórů. [11]

Kritická hodnota Fe v tavenině přímo souvisí s koncentrací Si ve slitině. Na obr. 7.1 je část Al - Si - Fe ternárního fázového diagramu ukazující příčinu existence kritického obsahu Fe. Se stoupajícím obsahem Si vzrůstá tolerovaný obsah Fe před vznikem  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází v Al - Si slitinách. Např. při obsahu Si 5 % je kritický obsah Fe ~ 0,35 %, při 9 % Si to je ~ 0,6 % a při 11 % Si tato kritická hodnota odpovídá 0,75 % Fe. Úsečka AB mezi prostorem  $\beta$  fáze a prostorem Al je doba, během které se tvoří větší množství škodlivých intermetalických částic. [12]



Obr. 7.1 Řez ternárním Al - Si - Fe fázovým diagramem ukazujícím tuhnutí Al všech slitin Al s kritickými hodnotami obsahu Fe. Pro 5 % Si (x - x'), 7 % Si (y - y') a 9 % Si (z - z') slitiny s 0,8 % Fe. Průsečky s úsečkou AB naznačují tvorbu velkých  $\beta$  fází před tvorbou eutektika při B [12]

## 7.1 Možné zdroje Fe v tavenině

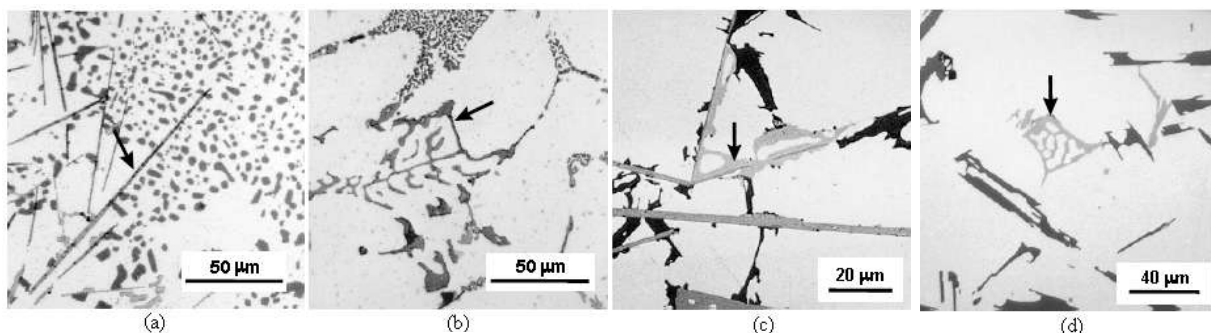
Neexistuje známý způsob, jak vhodně ekonomicky odstranit Fe z Al slitin, a proto hodnoty Fe z primárních housek (0,03 – 0,15 % Fe) jsou obvyklé, a další zvýšení obsahu Fe je způsobeno během tavení. Fe může vstoupit do roztaveného kovu během dalšího tavení podle dvou mechanismů: [12]

1. Roztavený Al je schopný rozpouštět Fe z použitého nářadí při úpravě taveniny, a ze zařízení pece. Obsah Fe v těchto případech může dosáhnout až 2 % v tavenině při běžné tavící teplotě ~ 700 °C. Je-li teplota taveniny 800 °C obsah Fe může vzrůstat až na hodnotu 5 %.
2. Železo může vstoupit do taveniny přidáním nízkolegovaných materiálů, např. Si, nebo přidáním šrotu, který může obsahovat vyšší obsah Fe, než primární kov.

## 7.2 Tvorba intermetalických fází

Ačkoli Fe je vysoce rozpustné v roztaveném Al a jeho slitinách, má velmi malou rozpustnost v tuhých slitinách, a proto inklinuje ke spojení s jinými elementy, aby tvořily intermetalické fáze různých typů. Při nepřítomnosti Si jsou převládající fáze, které Fe vytváří  $\text{Al}_3\text{Fe}$  a  $\text{Al}_6\text{Fe}$ , ale za přítomnosti Si jsou hlavní fáze  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$  (známé jako  $\alpha$  - fáze) a  $\text{Al}_5\text{FeSi}$  (známá jako  $\beta$  - fáze). Jestliže je přítomen také Mg s Si, mohou tvořit  $\pi$  - fáze  $\text{Al}_6\text{FeMg}_3\text{Si}_6$ . Další běžná fáze, kterou tvoří Mn s Si je  $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ , také známá jako  $\alpha$  - fáze. Tato fáze inklinuje přednostně k tvorbě jiné  $\alpha$  - fáze jakmile je přítomný Mn. [12]

Intermetalické fáze obsahující Fe mohou být pozorované uvnitř mikrostruktury Al - Si slitin, a obvykle jsou rozeznávané pod mikroskopem jejich tvarem (morfologií) a barvou. Obě tzv.  $\alpha$  - fáze tvoří podobné morfologie (obr. 7.2b), ale  $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$  varianty se mohou vyskytovat také jako více kompaktní, hranaté útvary, a někdy dokonce jako polyedrické krystaly.  $\pi$  - fáze také tvoří podobnou morfologii (obr. 7.2d), a je často, ale ne vždy, těsně připojená k  $\alpha$  - fázi (obr. 7.2c), která postupně tvoří destičky (obr. 7.2a,c).  $\beta$  - fáze má v prostoru tvar destičky, ale jakmile je pozorovaná v dvojrozměrném pohledu či fotografii, tyto destičky vypadají jako tzv. "jehlice". Různé tvary těchto Fe intermetalických fází jsou zodpovědné za účinek Fe na slévateľnost a mechanické vlastnosti. [12]

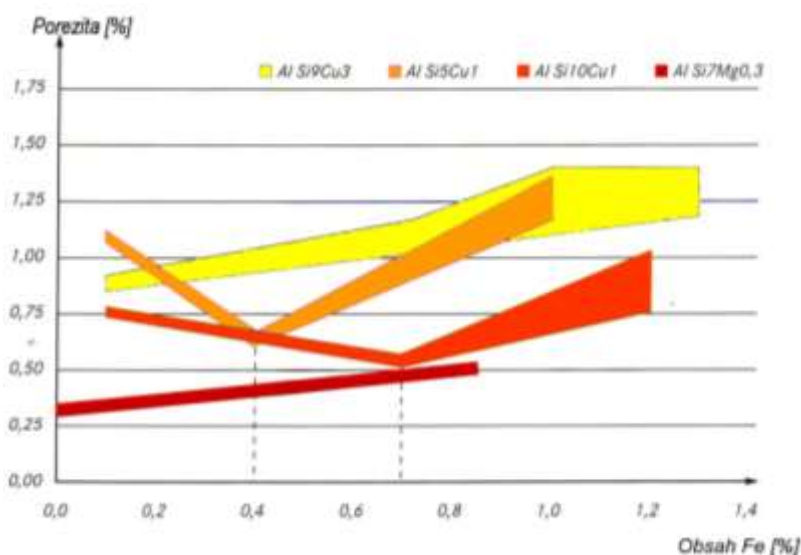


Obr. 7.2 Mikrosnímky různých intermetalických fází s obsahem Fe v Al-5%Si-1%Cu-0,5%Mg-(Fe) slitině: (a)  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) destičky; (b)  $\alpha$  ( $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ ); (c)  $\pi$  - fáze rostoucí z  $\beta$ ; (d)  $\pi$  - fáze [12]

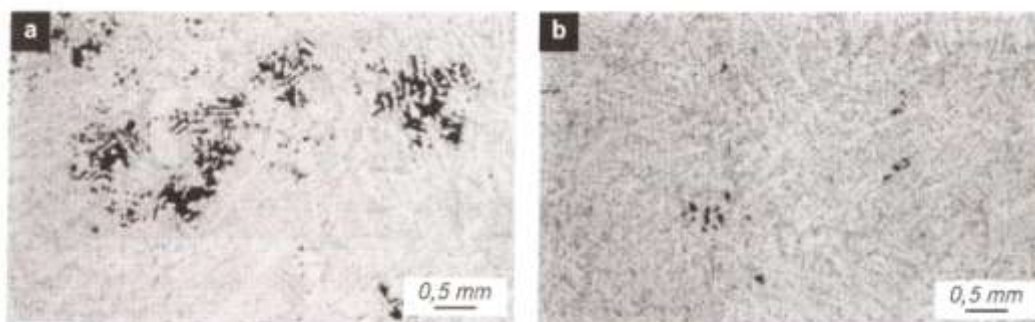
Přísadou Mn může být vznik porezity u Al-Si slitin redukován, a to tím, že jehlicovitá  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze díky přítomnosti Mn v kompaktní formě bude převedena na fázi  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ ). Tato fáze je často označována jako „čínské písmo“ s přítomností Mn, jež snižuje porezitu na základě zlepšené propustnosti tuhnuoucích fází. [11]

### 7.3 Vliv Fe na porezitu

Vliv obsahu Fe na porezitu je u různých slitin Al-Si různý viz obr. 7.3. Zásadní je, že se stoupajícím obsahem Fe se porezita zvyšuje, s ohledem na různé slitiny. U slitin AlSi5Cu1 a AlSi10Cu1 lze pozorovat, že na základě nízkého obsahu Fe nejdříve porezita klesá, poté po překročení kritické hodnoty stoupá. Z obrázku je patrné, že porezita od určitého obsahu Fe opět jasně stoupá. Tento vzestup je značný a vyskytuje se tzv. „pěnová porezita“. Příklad staženiny a „pěnové porezity“ je zobrazen na obr. 7.4. Lze vycházet z toho, že výskyt „pěnové porezity“ je spojován s výskytem  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze. Na obr. 7.5 je zobrazena litá struktura slitiny AlSi9Cu3 s různými obsahy Fe. Zatímco při obsahu 0,1% Fe nejsou pozorovány žádné  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze, při obsahu 1,0% Fe je výskyt těchto fází značný. [11]

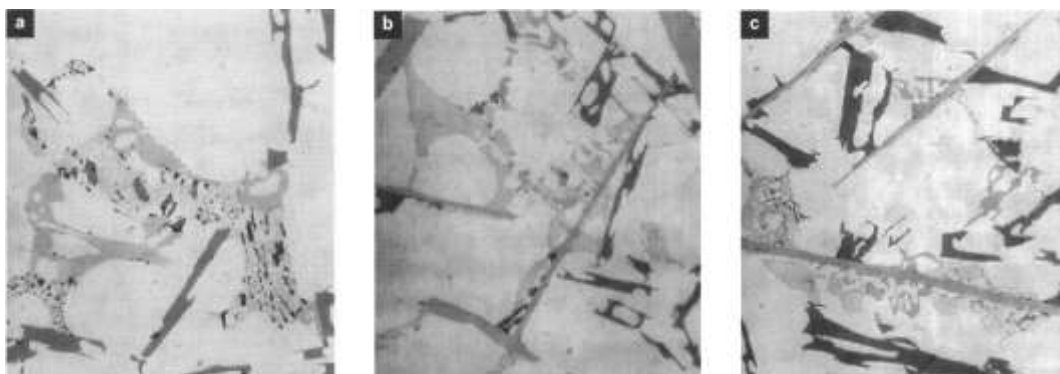


Obr. 7.3 Vliv Fe na porezitu různých Al-Si slévárenských slitin [13]



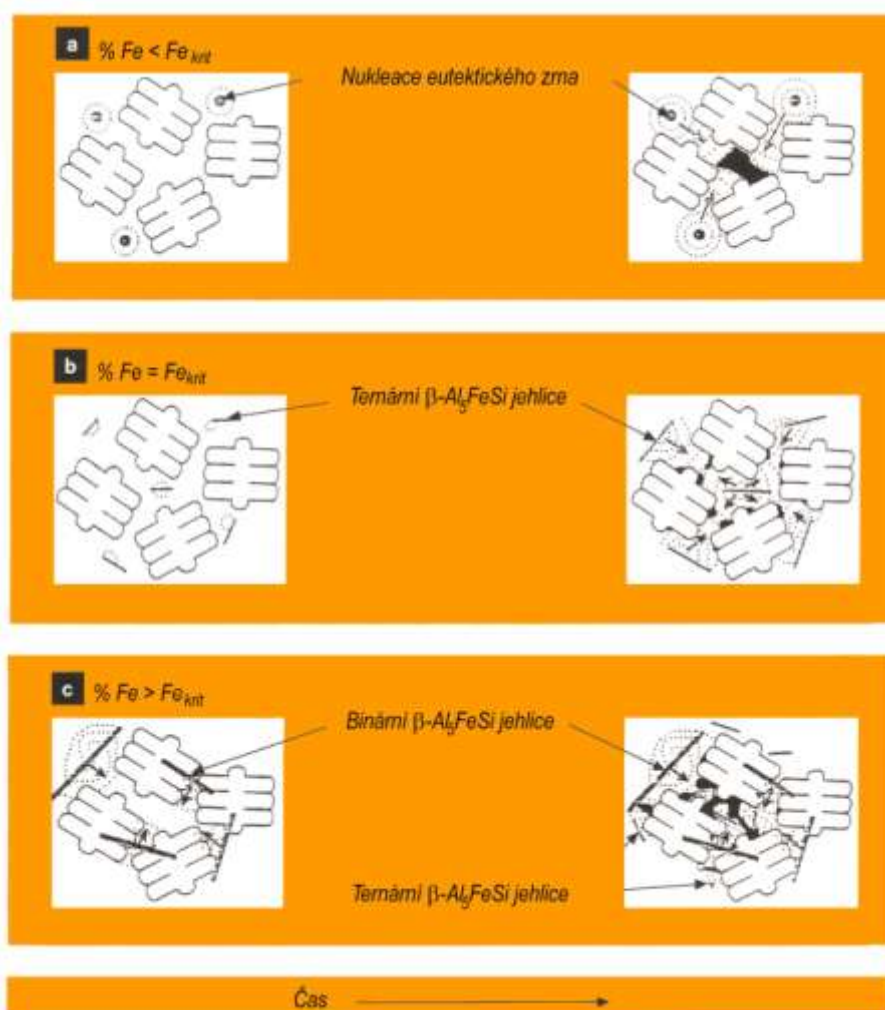
Obr. 7.4 Vytvoření staženin a „pěnové porezity“ u AlSi9Cu3 při různém obsahu Fe:  
a) 0,1 % Fe, b) 1,0 % Fe [13]





Obr. 7.5 Litá struktura slitiny AlSi9Cu3 s různými obsahy Fe: a) 0,1 % Fe, intermetalická fáze:  $\pi$ -Al<sub>8</sub>Mg<sub>3</sub>FeSi<sub>6</sub>, Al<sub>2</sub>Cu; b) 0,6 % Fe, intermetalická fáze:  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi, Al<sub>2</sub>Cu; c) 1,0 % Fe, intermetalická fáze:  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi, Al<sub>2</sub>Cu [13]

Mechanismus vzniku porezity vlivem přítomnosti Fe lze vysvětlit dle obr. 7.6. Při podkritickém obsahu Fe dochází po vytvoření dendritů Al přímo k nukleaci eutektického zrna a vzniká tzv. mezidendritická staženina. Kritický obsah Fe vede k vyloučení  $\beta$  (Al<sub>5</sub>FeSi) fáze. Je-li obsah Fe příliš vysoký (např. 1%),  $\beta$  - fáze tvoří v kombinaci s eutektickými zrnky síť se silně sníženou propustností taveniny, čímž je zřetelně znesnadněno dosazování kovu. Dochází k tvorbě „pěnové porezity“. [11]

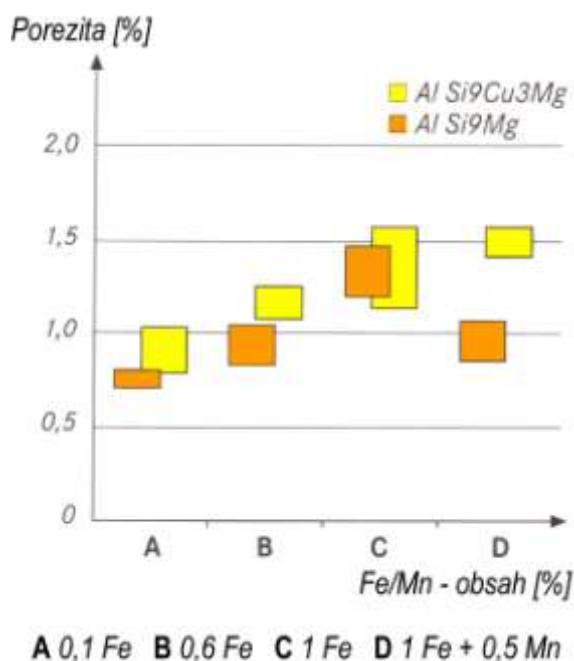


Obr. 7.6 Mechanismus vzniku porezity vlivem Fe [13]



## 7.4 Vliv Mn na porezitu

Mnoho výzkumů udává, že porezitu spojenou s Fe u Al-Si slitin lze snížit přísadou Mn. Tento mechanismus lze vysvětlit tak, že při přítomnosti dostatečného množství Mn se intermetalická fáze s Fe změní na  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ ) a díky této kompaktní fázi nedochází k tak rozsáhlé porezitě. [11], [13]



Obr. 7.7 Vliv obsahu Mn na porezitu u slitiny AlSi9Cu3 a AlSi9Mg [13]

Na obr. 7.7 je ukázán vliv obsahu Mn na porezitu slitin AlSi9Cu3Mg a AlSi9Mg při různém obsahu Fe. Pro obě slitiny bylo nejdříve zjištěno, že se porezita se stoupajícím obsahem Fe výrazně zvětšuje. Přísada 0,5% Mn sníží porezitu, ale pouze u slitin bez přítomnosti Cu s obsahem Fe více jak 1%. Porezita je v tomto případě redukována na hodnoty, které odpovídají obsahu Fe kolem 0,6%. Pokračováním výzkumu bylo jednoznačně zjištěno, že přísada Mn způsobí u vysokých obsahů Fe (1%) redukci porezity. [11]

## 8 PROVEDENÝ EXPERIMENT VLIVU Fe A Mn NA STRUKTURU

Vzhledem k celkem rozsáhlému výskytu porezity dle kapitoly č. 3 a 4 nejen z důvodů naplynění, ale také díky výskytu nepříznivých  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází u vybraných odlitků by bylo vhodné nadále se této problematice věnovat, a proto bylo provedeno několik taveb se sledováním vlivu obsahu Mn na vznik  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází.

Experiment byl proveden v provozních podmínkách společnosti na pracovišti neželezných kovů, a proto musel být naplánován tak, aby nedošlo k ovlivnění chodu slévárny. Hlavním cílem bylo zkoumání vlivu změny chemického složení taveniny na vznikající porezitu (zda dojde ke snížení porezity či nikoliv). Byl dán předpoklad, že přidáním Mn do taveniny by mělo dle [11] docházet ke změně  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) jehlicovité fáze na kompaktnější  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ ) fázi, která je vzhledem k tvorbě porezity příznivější.

Chemické složení dané tavby bylo upravováno postupným přidáváním daného množství předslitiny  $\text{AlMn20}$  (obr. 8.1) s chemickým složením viz tab. 8.1 dle jakostního osvědčení. Množství přidávané předslitiny bylo vypočítáno dle vzorce (8.1) [2]:

$$\text{předslitina} = \frac{\Delta \text{Mn}}{\text{Mn}_{\text{předslitiny}}} \cdot 100 \quad (8.1)$$

( $\text{kgpředslitiny} / 100\text{kg taveniny}$ )



Obr. 8.1 Housky předslitiny  $\text{AlMn20}$

kde:  $\Delta \text{Mn}$  - rozdíl mezi požadovaným a aktuálním obsahem prvku Mn ve slitině (%)  
 $\text{Mn}_{\text{předslitiny}}$  - koncentrace přísadového prvku (Mn) v předslitině (%)

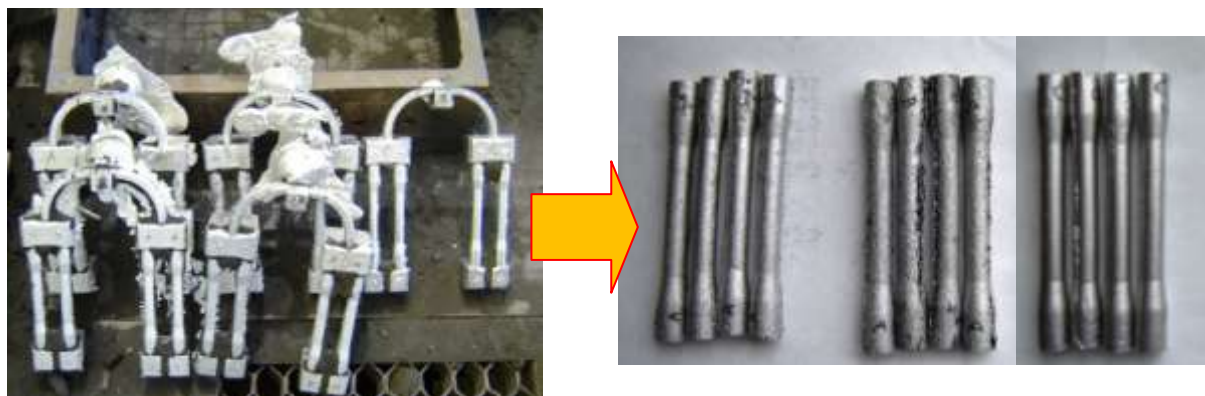
Tab. 8.1 Chemické složení předslitiny  $\text{AlMn20}$  dle jakostního osvědčení

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Pb
hm. %	0,1	0,67	0,14	20,77	0,00	0,01	0,01	0,05	0

Dále byly ke každé tavně odlity čtyři zkušební tyče (obr. 8.3) a následně vyhodnocovány. Pro odlití těchto tyčí bylo zapotřebí zaformování forem (obr. 8.2) ze stejného materiálu jako byly odlévány odlitky, ze kterých byly odebrány vzorky k dalšímu zkoumání.



Obr. 8.2 Modelové zařízení a formování zkušebních tyček



Obr. 8.3 Příprava tyček pro stanovení pevnosti v tahu

Zkouška tahem byla prováděna na zařízení ve společnosti viz foto na obr. 8.4. A následně byla na obroušených plochách zkušebních tyček provedena zkouška tvrdosti dle Brinella, což spočívá ve vtláčování ocelové kuličky do zkoušeného materiálu po dobu 30 sekund, při zatížení 10 kN. Zařízení použité pro zkoušku tvrdosti je na obr. 8.5.



Obr. 8.4 Zařízení pro stanovení meze pevnosti



Obr. 8.5 Zařízení používané pro zkoušku tvrdosti dle Brinella



## 8.1 Slitina AlSi8Cu3 (A, B, C)

### 8.1.1 Tavba A

Tavení této slitiny probíhalo v 600 kg plynové peci ozn. PEC č. 5. První tavba byla složena z klasických surovin (vratný materiál a housky), dále byla provedena modifikace (6 tablet) a odplynění (6 tablet). Roztavení této tavby trvalo cca 1 hod. a 30 min. Po roztavení byl těsně před odlitím změřen index hustoty již na novém zařízení VTC a teplota taveniny. Poté byly odlity čtyři zkušební tyčky a následovalo odlévání odlitků.

#### Počáteční podmínky tavby A

Tab. 8.2 Naměřené hodnoty tavby A

Měřená veličina	hodnota
Přidáno AlMn20	-
Doba tavení	1 hod. 30 min.
Teplota lití	752 °C
Index hustoty	DI = 4,85 %

### 8.1.2 Tavba B

Po odlití zkušebních tyček tavby A byla do taveniny přidána předslitina AlMn20. Množství taveniny bylo již pouhých 400 kg. Dále byly vhozeny 2 modifikační a 2 odplyňovací tablety. Tavení trvalo cca 30 min., byla změřena teplota, stanoven index hustoty a následně byly opět odlity zkušební tyčky a odlitky.

#### Počáteční podmínky tavby B

Tab. 8.3 Naměřené veličiny tavby B

Měřená veličina	hodnota
Přidáno AlMn20	2,14 kg
Doba tavení po přidání předslitiny	30 min.
Teplota lití	745 °C
Index hustoty	DI = 5,32 %



### 8.1.3 Tavba C

Následovala tavba C opět přidáním předslitiny AlMn20 do 300 kg taveniny, domodifikováním, odplyněním a opět odlitím odlitků a zkušebních tyček.

#### Počáteční podmínky tavby C

Tab. 8.4 Naměřené veličiny tavby C

Měřená veličina	hodnota
Přidáno AlMn20	2,01 kg
Doba tavení po přidání předslitiny	25 min.
Teplota lití	742 °C
Index hustoty	DI = 6,57 %

## 8.2 Shrnutí taveb A, B, C

Provedená chemická analýza vzorků potvrdila rostoucí množství Mn ve slitině viz tab. 8.5. Na obr. 8.6a lze pozorovat rostoucí množství Mn v jednotlivých tavebách. Zatímco při tavebě B vzrostl obsah Mn pouze o 0,04 %, tavba C vykazuje nárůst o 0,5 % od tavby A, což mohlo být způsobeno dlouhou dobou rozpouštění Mn ve slitině, proto tavba B nevykazuje tak významný rozdíl obsahu Mn.

Tab. 8.5 Chemické složení tavby A, B, C v hm. %

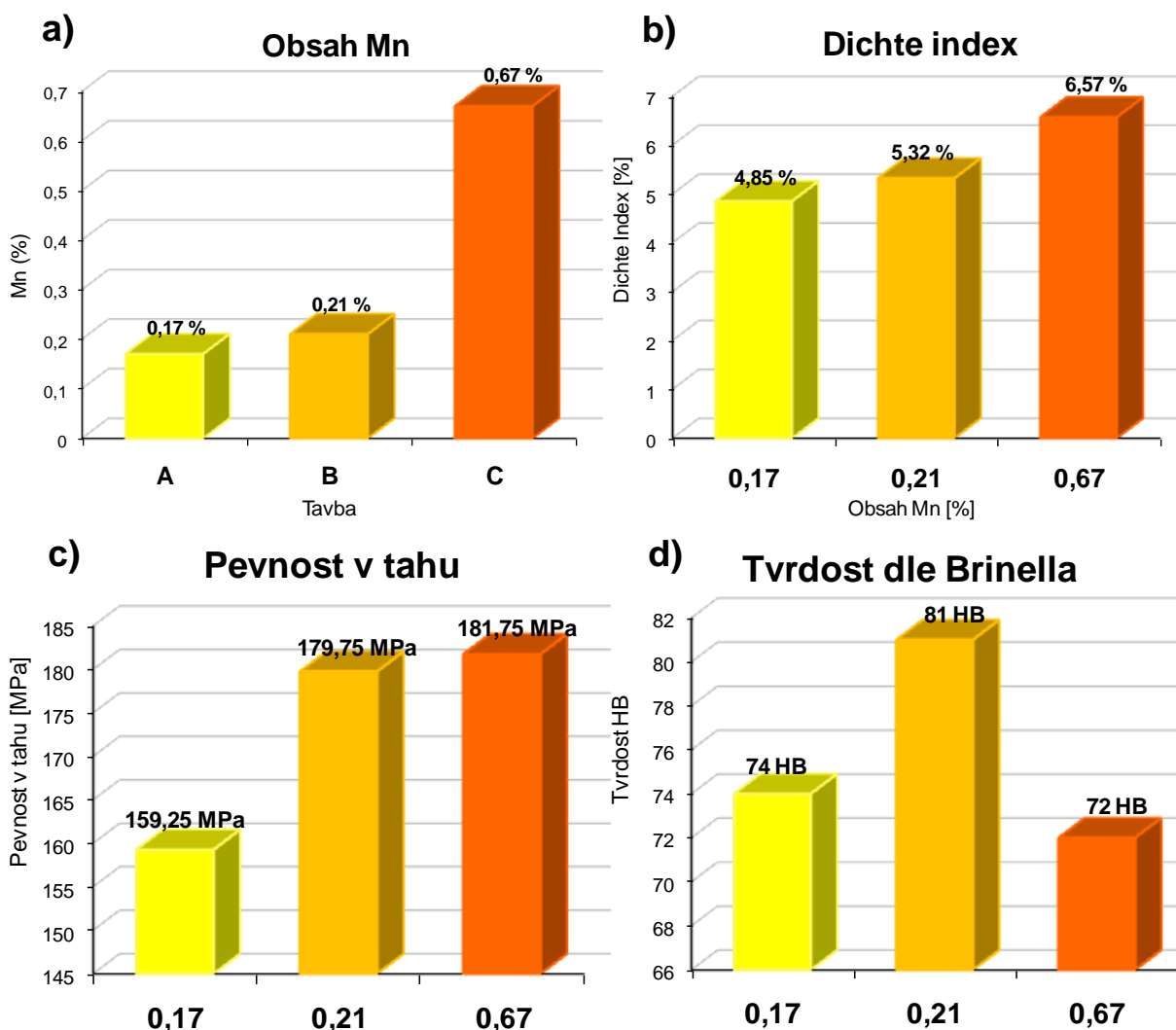
Prvek		Si	Mn	Mg	Cu	Fe	Ni	Ti	Zn	Ca
Tavba ozn.	A	9,84	0,17	0,25	2,32	0,57	-	-	0,5	-
	B	9,61	0,21	0,27	2,22	0,54	-	-	0,61	-
	C	9,37	0,67	0,24	2,04	0,61	-	-	0,43	-

Na Obr. 8.6b lze pozorovat rostoucí stupeň Dichte indexu, což je pravděpodobně způsobeno dlouhodobým tavením.

Mezi další důležité poznatky patří navýšení pevnosti v tahu u tyček litých do bentonitové formy. U surových odlitků tyček bylo nutné nejprve ořezat vtokovou soustavu pásovou pilou. Tyčky byly trhány s licí kůrou bez zabroušení švů (obr. 8.3). Dle Obr. 8.6c lze sledovat, že se stoupajícím obsahem Mn ve slitině pevnost v tahu stoupá, což je pravděpodobně dle [2] způsobeno kompenzací nepříznivého vlivu Fe přidávaným Mn.

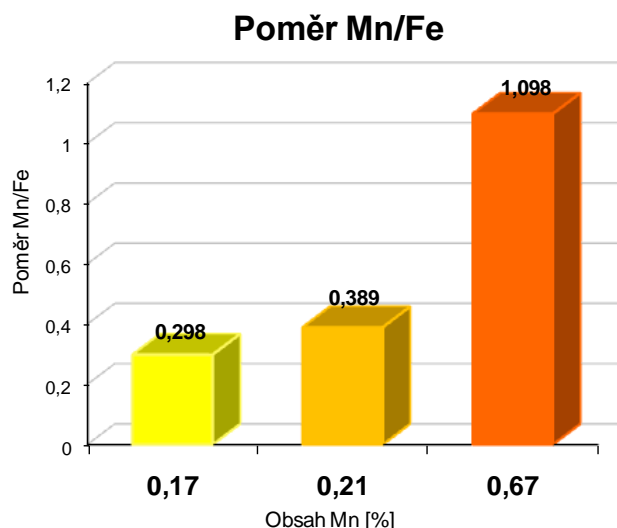
Tab. 8.6 Naměřené hodnoty pevností v tahu a tvrdostí dle Brinella

Označení tyček		A (AlSi8Cu3)		B (AlSi8Cu3)		C (AlSi8Cu3)	
Pevnost v tahu [MPa]	Tvrdost dle Brinella HB	151	78	179	82	175	72
		171	73	179	85	185	75
		159	72	186	78	185	68
		156	73	175	79	182	73
Aritmetický průměr		159,25	74	179,75	81	181,75	72



Obr. 8.6 Závislosti naměřených hodnot: a) rostoucí obsah Mn v jednotlivých tavbách; b) rostoucí Dichte index se stoupajícím obsahem Mn; c) rostoucí pevnost v tahu se stoupajícím obsahem Mn; d) kolísavé hodnoty tvrdosti se stoupajícím obsahem Mn

V následujícím grafu (obr. 8.7) je viditelný nárůst poměru obsahu Mn/Fe u jednotlivých taveb. Nejvýhodnější poměr Mn/Fe je dle [2] 0,5, čemuž se nejvíce přibližuje tavba B (~ 0,39). Tavba C (~ 1,1) už tuto hodnotu výrazně překračuje a lze tedy očekávat výrazné změny ve struktuře (viz obr. 8.12 a obr. 8.13).



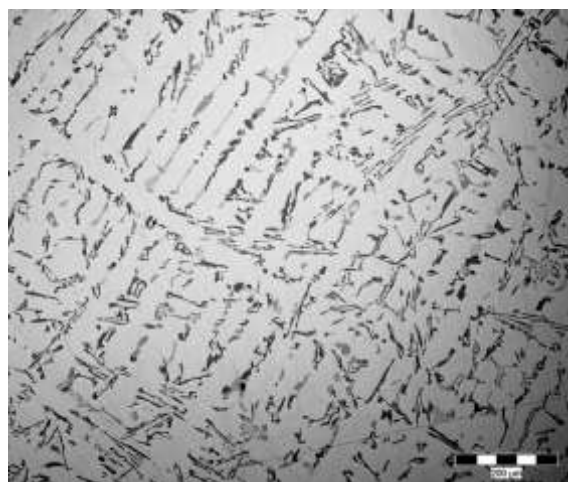
Obr. 8.7 Znáznorněný nárůst poměru Mn/Fe se vzrůstajícím obsahem Mn



## 8.3 Vyhodnocení metalografické struktury tavby A, B, C

### 8.3.1 Vzorek A

Vzorek A vykazuje celkem rozsáhlý výskyt porezity v celém průřezu vzorku, což se vzhledem k předchozím výsledkům dalo očekávat. Na následujících snímcích viz obr. 8.8 a obr. 8.9 bude možné pozorovat změnu struktury zvýšením obsahu Mn ve slitině AlSi8Cu3.



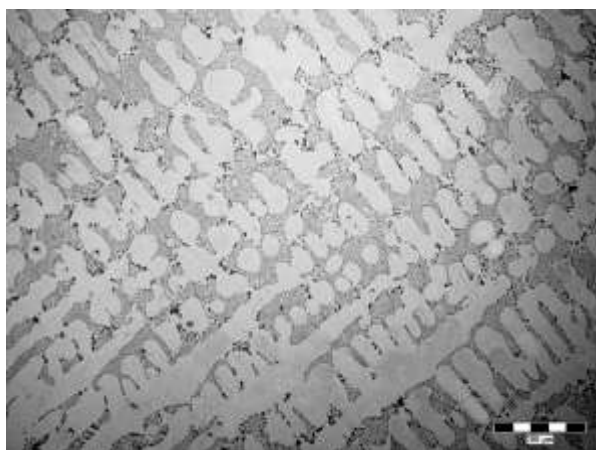
Obr. 8.8 Struktura vzorku A, slitina AlSi8Cu3, zv. 100 x



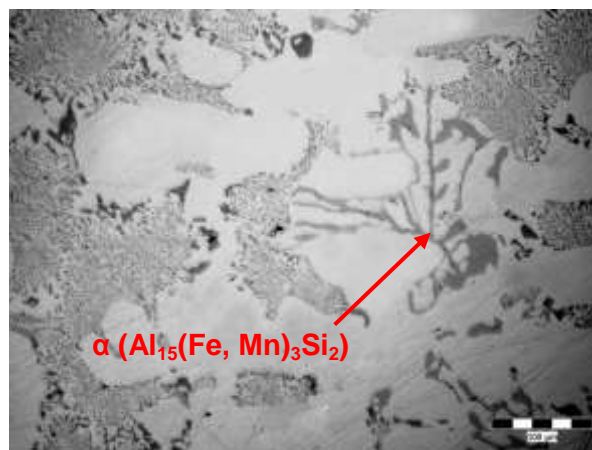
Obr. 8.9 Zobrazený pór na vzorku A, zv. 200x

### 8.3.2 Vzorek B

Na snímku B nebyla zjištěna žádná porezita vznikající vlivem nežádoucích  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází, což lze považovat za příznivé. Tento výsledek může být odůvodněn téměř ideálním poměrem obsahu Mn/Fe ( $\sim 0,39$ ) viz tab. 8.5 s celkem vhodným chemickým složením Fe (0,54 %) a Mn (0,21 %). Na vzorku B je možné nalézt i občasný výskyt  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ ) fází viz obr. 8.11, které vznikly náhradou atomů Fe za Mn.



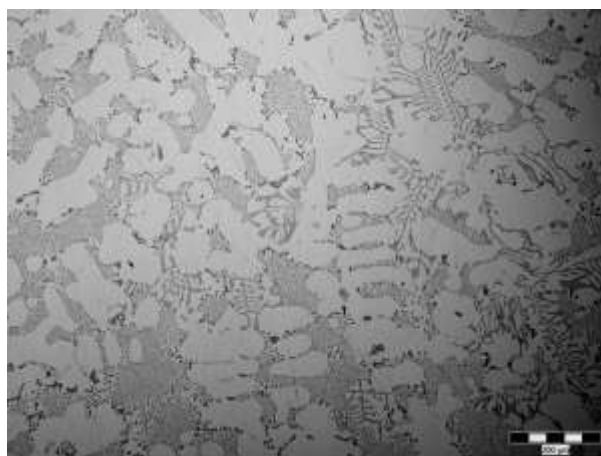
Obr. 8.10 Struktura vzorku B, zv. 100 x



Obr. 8.11 Vzorek B, zv. 200 x

### 8.3.3 Vzorek C

Snímky vzorku z tavby C vykazují opět výskyt drobné porezity doprovázené celkem rozsáhlými oblastmi s výskytem  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ ) fází viz obr. 8.12 a obr. 8.13.



Obr. 8.12 Vzorek C, zv. 100 x



Obr. 8.13 Vzorek C, zv. 400 x



## 8.4 Slitina AlSi10Mg (D, E)

Jelikož v den experimentů nebylo již možné vzhledem k malému množství taveniny v pecích na konci směny provést tolik taveb jako v předchozím případě slitiny AlSi8Cu3. Byly provedeny pouze 2 tavby D a E. Ale i v těchto dvou tavnách lze pozorovat jisté rozdíly uvedené v následujícím textu.

### 8.4.1 Tavba D

Tavení slitiny AlSi10Mg probíhalo v 700 kg plynové peci ozn. PEC č. 6. První tavba byla složena z klasických surovin (vratný materiál a housky), dále byla provedena modifikace (6 tablet) a odplynění (6 tablet). Odběr taveniny pro odlití zkušebních tyček ozn. D byl proveden v době, kdy bylo v peci 550 kg taveniny.

#### Počáteční podmínky tavby D

Tab. 8.7 Naměřené veličiny tavby D

Měřená veličina	hodnota
Přidáno AlMn20	-
Doba tavení po posledním odběru taveniny	35 min.
Teplota lití	730 °C
Index hustoty	DI = 5,98 %

### 8.4.2 Tavba E

Po odlití odlitků a zkušebních tyček tavby D byla do taveniny přidána předslitina AlMn20. Množství taveniny bylo již pouhých 450 kg. Dále byly vhozeny 1 modifikační a 2 odplyňovací tablety. Během čekání při tavení bylo po 20 minutách od vhození předslitiny zkontrolováno chemické složení (bez odlití zkušebních tyček) a stanoven index hustoty.

#### Počáteční podmínky tavby E

Tab. 8.8 Naměřené veličiny tavby E - zkouška

Měřená veličina	hodnota
Přidáno AlMn20	1,82 kg
Doba tavení po přidání předslitiny	20 min.
Teplota lití	-
Index hustoty	DI = 6,02 %



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

### Naměřené hodnoty během tavyby E

Další tavení trvalo cca 30 minut, byla změřena teplota, stanoven index hustoty a následně byly odlity zkušební tyčky a odlitky.

Tab. 8.9 Naměřené veličiny tavyby E

Měřená veličina	hodnota
Přidáno AlMn20	1,82 kg
Doba tavení po přidání předslitiny	50 min.
Teplota lití	732 °C
Index hustoty	DI = 6,46 %

Podle chemického složení lze pozorovat nárůst Mn, ale pouze na hodnotu 0,13 %, což stále není ani polovina obsahu Fe. Bohužel, vzhledem k malému množství taveniny v peci již nebylo možné přidávat další předslitinu a experiment musel být ukončen.

### 8.5 Shrnutí taveb D, E

V tab. 8.10 a na obr. 8.14a lze sledovat rovnoměrně rostoucí množství Mn v jednotlivých tavnách, což splňuje předpoklad. Maximální hodnota obsahu Mn po přidání předslitiny byla pouze 0,13 % Mn, z čehož lze předpokládat, že změny struktury v jednotlivých vzorcích nebudou tolik výrazné.

Tab. 8.10 Chemické složení tavyby D, d, E v hm. %

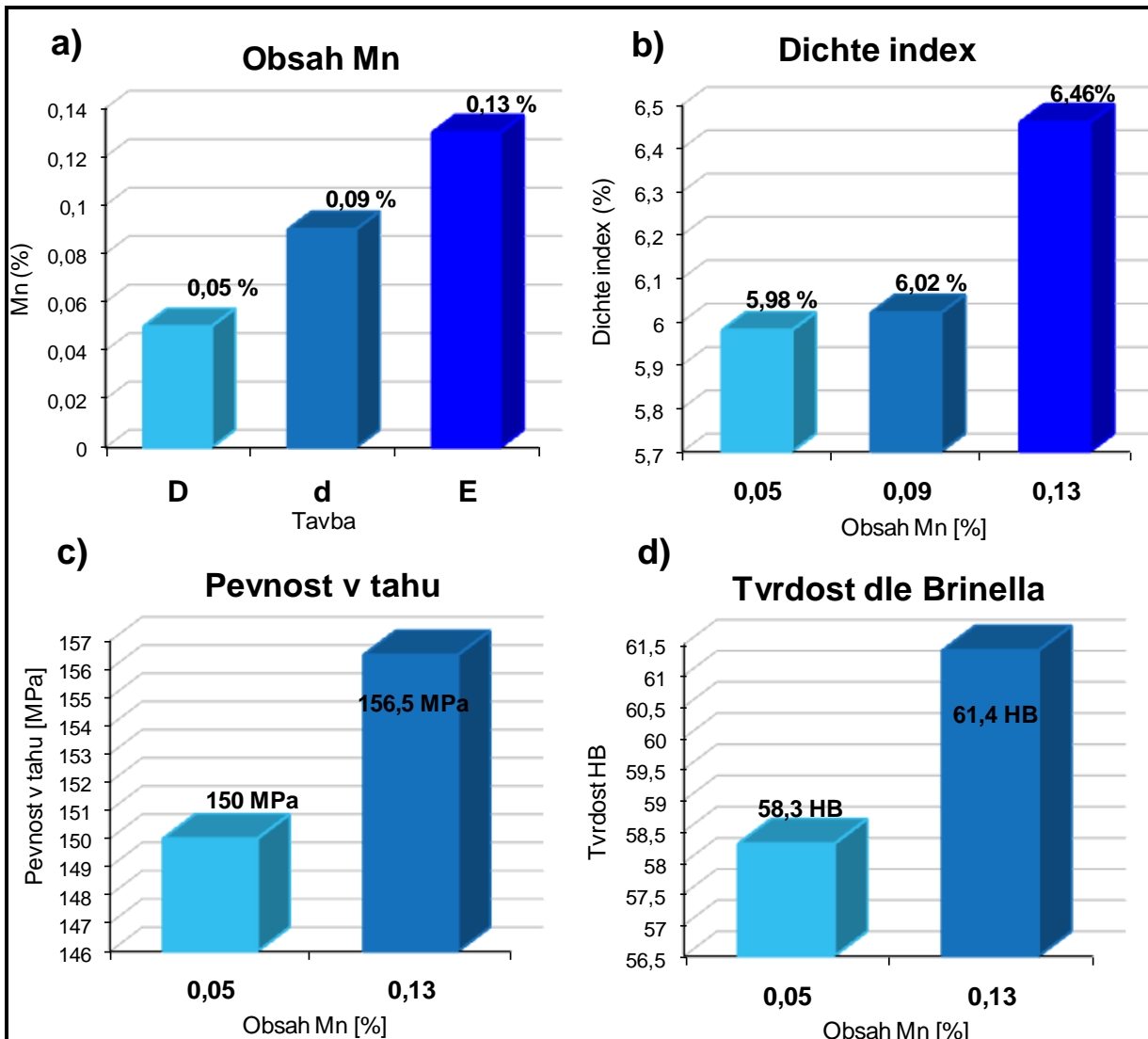
Prvek		Si	Mn	Mg	Cu	Fe	Ni	Ti	Zn	Ca
Tavba	D	9,74	0,05	0,24	0,001	0,531	0,007	0,048	0,018	0,005
	d	10,13	0,09	0,24	0,012	0,417	0,008	0,060	0,026	0,004
	E	10,54	0,13	0,22	0,015	0,422	0,011	0,073	0,019	0,004

Na obr. 8.14 lze pozorovat rostoucí stupeň Dichte indexu, což je stejně jako v předchozích tavnách pravděpodobně způsobeno dlouhodobým tavením.

Mezi další důležité poznatky lze zahrnout navýšení pevnosti v tahu u tyček litých do bentonitové formy bez zabroušení švů. Dle obr. 8.14c lze pozorovat, že se stoupajícím obsahem Mn ve slitině pevnost v tahu stoupá. Záznam pevností jednotlivých tyček je v tab. 8.11.

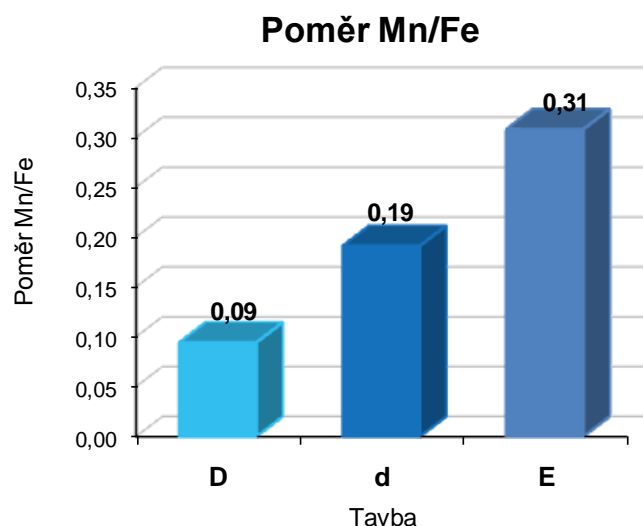
Tab. 8.11 Naměřené hodnoty pevností v tahu a tvrdostí dle Brinella

Označení tyček		D (AlSi10Mg)		E (AlSi10Mg)	
Pevnost v tahu [MPa]	Tvrdost dle Brinella HB	136	53,2	162	65,6
		153	59,8	153	59,2
		156	62	149	62,1
		155	58,2	162	58,7
Aritmetický průměr		150	58,3	156,5	61,4



Obr. 8.14 Závislosti naměřených hodnot: a) rostoucí obsah Mn v jednotlivých tavnách; b) rostoucí Dichte index se stoupajícím obsahem Mn; c) rostoucí pevnost v tahu se stoupajícím obsahem Mn; d) rostoucí hodnoty tvrdosti se stoupajícím obsahem Mn

V následujícím grafu (obr. 8.15) je viditelný nárůst poměru obsahu Mn/Fe u jednotlivých taveb. Nejvýhodnější poměr Mn/Fe je dle [2] 0,5, čemuž se nejvíce blíží tavba E (~ 0,31), tato hodnota byla u experimentů D a E maximální. Další tavnice už provedeny nebyly, proto struktura pravděpodobně nebude obsahovat tolik rozsáhlé  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ ) fáze jako tomu bylo u vzorku C v předchozí kapitole č. 8.



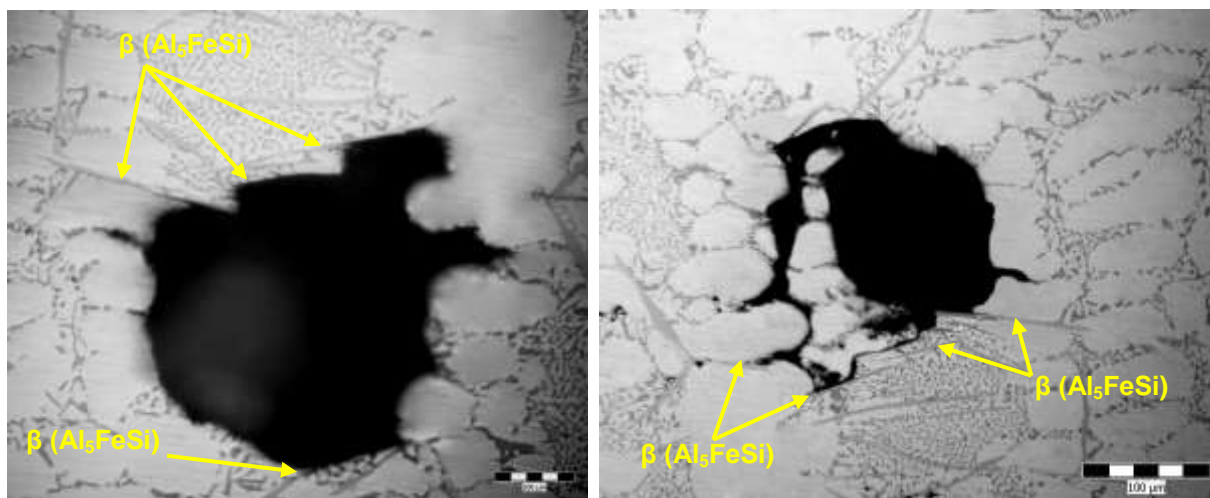
Obr. 8.15 Znáznorněný nárůst poměru Mn/Fe u jednotlivých taveb



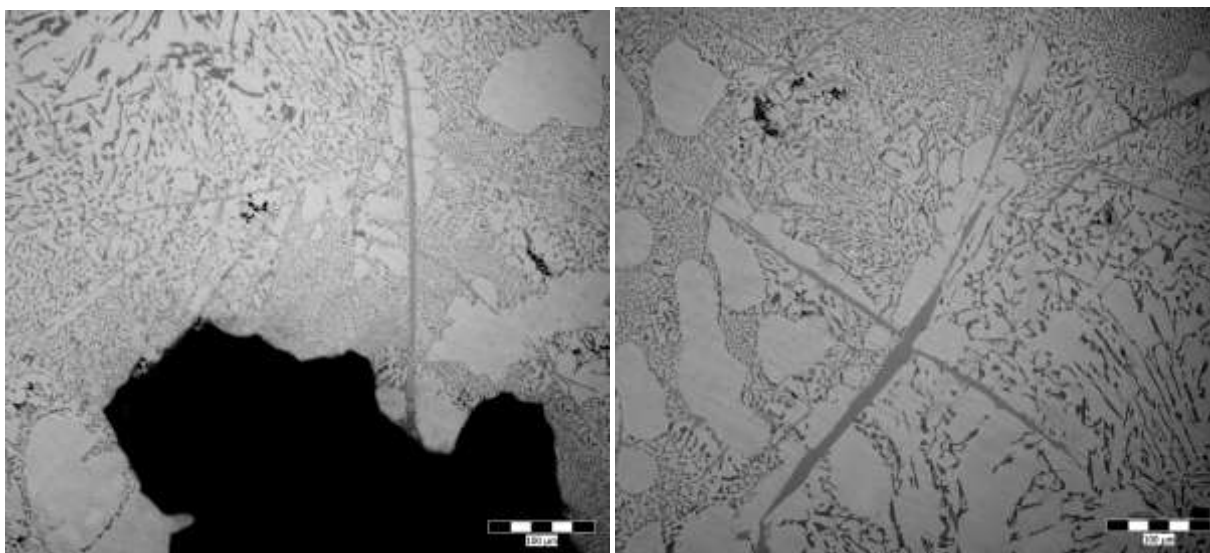
## 8.6 Vyhodnocení metalografické struktury tavby D, E

### 8.6.1 Vzorek D

Vzorek D vykazuje celkem rozsáhlý výskyt porezity v celém průřezu vzorku často doprovázený nepříznivými  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fázemi viz obr. 8.16. Velké jehlice  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze lze sledovat také na obr. 8.17.



Obr. 8.16 Porezita vzniklá zabráněním přísunu taveniny vlivem  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze, zv. 200 x

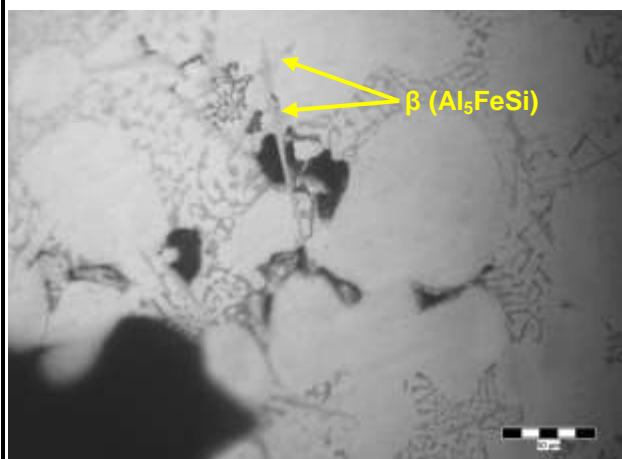


Obr. 8.17 Rozsáhlé  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze ve struktuře, zv. 200 x



### 8.6.1 Vzorek E

Předpokládaný výskyt nežádoucích  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází u vzorku E je dle metalografického šetrnění potvrzen, což vychází z poměru chemického složení Mn/Fe viz obr. 8.15. Rozložení těchto fází je na rozdíl od předchozího vzorku D méně rozsáhlý.



Obr. 8.19 Výskyt  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází ve spojitosti s porezitou, zv. 400 x



Obr. 8.18 Výskyt  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází ve struktuře, zv. 200 x



## 8.7 Slitina AlSi10Mg (F, G, H, I)

### 8.7.1 Tavba F

Tavení slitiny AlSi10Mg probíhalo v 600 kg plynové peci ozn. PEC č. 4. První tavba byla složena z klasických surovin (vratný materiál a housky), dále byla provedena modifikace (6 tablet) a odplynění (6 tablet). Roztavení této tavby trvalo cca 1 hod. a 25 min. Po roztavení byl těsně před odlitím změřen Dichte index již na novém zařízení VTC a teplota taveniny. Poté byly odlity čtyři zkušební tyčky a následovalo odlévání odlitků.

#### Počáteční podmínky tavby F

Tab. 8.12 Naměřené veličiny tavby F

Měřená veličina	hodnota
Přidáno AlMn20	-
Doba tavení	1 hod. 25 min.
Teplota lití	748 °C
Index hustoty	DI = 7,01 %

### 8.7.2 Tavba G

Po odlití odlitků a zkušebních tyček tavby F byla do taveniny přidána předslitina AlMn20. Množství taveniny bylo již pouhých 500 kg. Dále byly vhozeny 1 modifikační tableta a 2 odplyňovací. Tavení trvalo cca 20 minut, byla změřena teplota, stanoven index hustoty a následně byly opět odlity zkušební tyčky a odlitky.

#### Počáteční podmínky tavby G

Tab. 8.13 Naměřené veličiny tavby G

Měřená veličina	hodnota
Přidáno AlMn20	2,43 kg
Doba tavení po přidání předslitiny	20 min.
Teplota lití	751 °C
Index hustoty	DI = 6,40 %



### 8.7.3 Tavba H

Následovala tavba H, ovšem po předchozí zkušenosti u materiálu AlSi8Cu3 (tavba C) se již předslitina Mn nepřidávala, jelikož by mohlo dojít k přílišnému vzrůstu obsahu Mn, což je vzhledem k provozním podmínkám a odlévané sérii odlitků nevhodné. Pozorovala se tedy pouze změna chemického složení vzhledem k době rozpouštění Mn. Podle očekávání obsah Mn z předchozí tavby G i nadále stoupal viz obr. 8.20a.

#### Počáteční podmínky tavby H

Tab. 8.14 Naměřené veličiny tavby H

Měřená veličina	hodnota
Přidáno AlMn20	-
Doba tavení po přidání předslitiny	30 min.
Teplota lití	749 °C
Index hustoty	DI = 5,7 %

### 8.7.1 Tavba I

Následoval kontrolní odběr I (bez přidání Mn) po 5 minutách od odlití zkušebních tyček H, a opět byl chemickou analýzou zjištěn mírný nárůst obsahu Mn překračující obsah Fe. Poté byly odlity zkušební tyčky.

#### Kontrolní tavba I

Tab. 8.15 Naměřené veličiny kontrolní tavby I

Měřená veličina	hodnota
Přidáno AlMn20	-
Doba tavení po posledním odlití zkušebních tyček	5 min.
Teplota lití	752 °C
Index hustoty	-



## 8.8 Vyhodnocení Tavby F, G, H, (I)

Počáteční chemické složení (viz tab. 8.16) ukazuje nevyhovující obsah Si (příliš nízký), jelikož podle normy EN 1706 má být obsah Si v rozmezí 9 – 11 %. Proto bylo do taveniny přidáno 3 kg housky pro zvýšení obsahu Si, a následně byla opět provedena kontrola chemického složení viz tab. 8.16 tavba F. Na obr. 8.20a a v tab. 8.16 lze poté sledovat pozvolný nárůst množství Mn v jednotlivých tavbách, což splňuje předpoklad.

Tab. 8.16 Chemické složení tavby F, G, H, (I) v hm. %

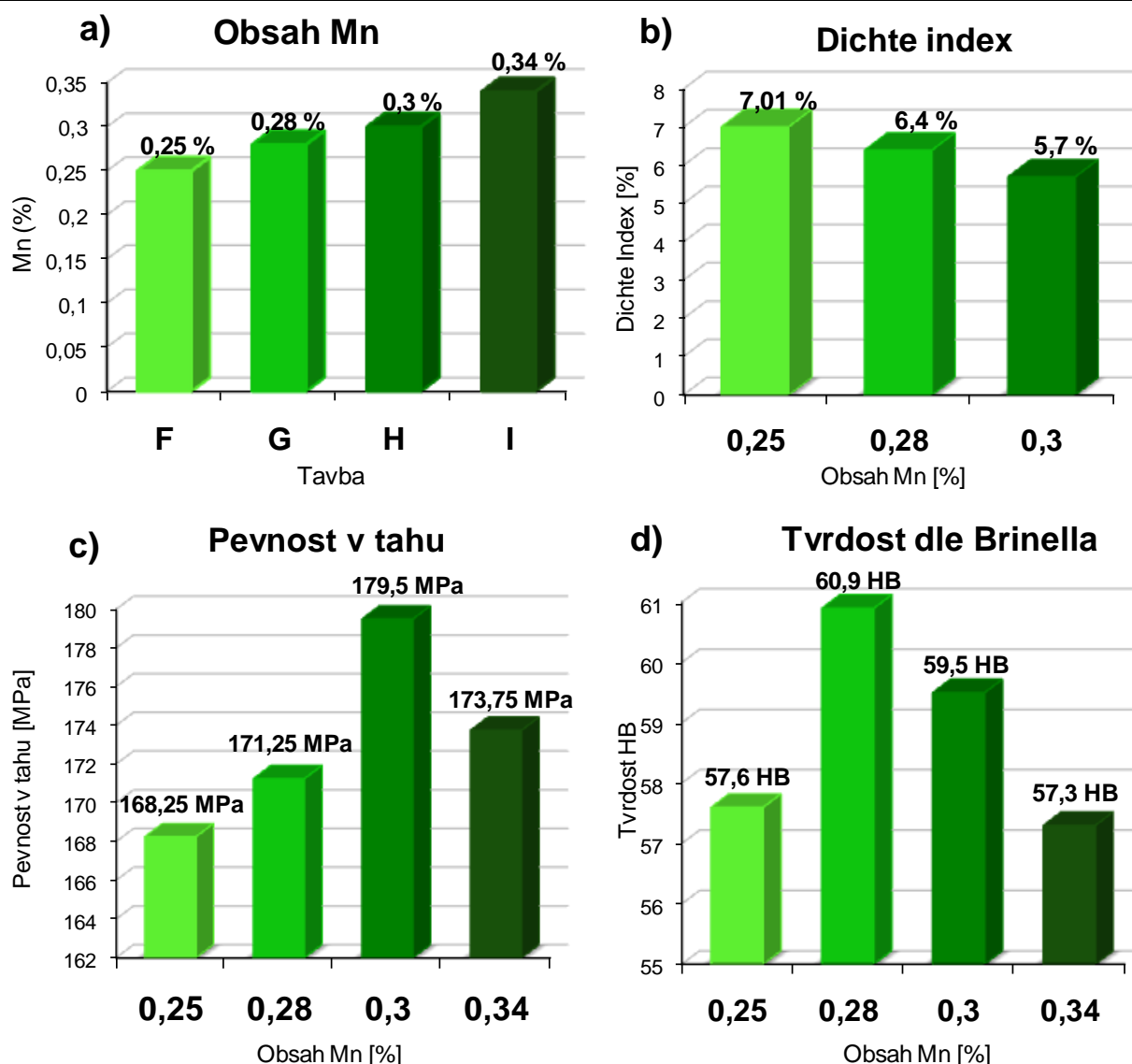
Prvek		Si	Mn	Mg	Cu	Fe	Ni	Ti	Zn	Ca
Tavba ozn.	počátek	<b>8,88</b>	<b>0,18</b>	0,30	0,00	<b>0,303</b>	0,006	0,066	0,00	0,002
	F	9,99	<b>0,25</b>	0,31	0,005	<b>0,328</b>	0,01	0,064	0,006	0,002
	G	10,34	<b>0,28</b>	0,27	0,00	<b>0,358</b>	0,01	0,061	0,006	0,004
	H	10,17	<b>0,30</b>	0,28	0,00	<b>0,302</b>	0,006	0,06	0,003	0,001
	I	10,31	<b>0,34</b>	0,25	0,00	<b>0,311</b>	0,004	0,045	0,001	0,001

Mezi další důležité poznatky lze zahrnout navýšení pevnosti v tahu u tyček litých do bentonitové formy bez zabroušení švů. Dle obr. 8.20c lze pozorovat, že se stoupajícím obsahem Mn ve slitině pevnost v tahu stoupá. Záznam pevností jednotlivých tyček je v tab. 8.17.

Na zbroušených tyčkách použitých pro zkoušku pevnosti v tahu byla dále provedena zkouška tvrdosti dle Brinella (tab. 8.17). Nárůst s následným poklesem tvrdosti je viditelný na obr. 8.20d.

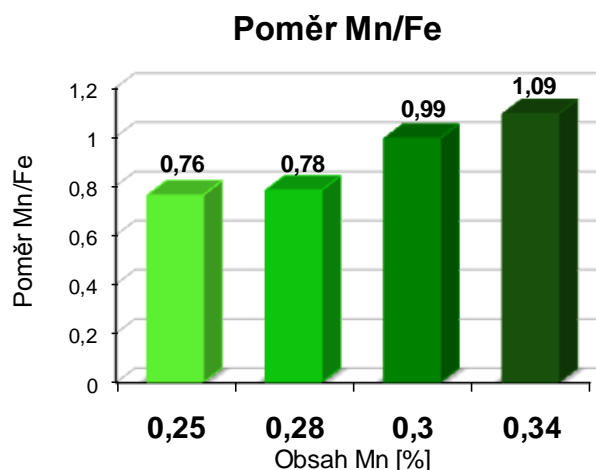
Tab. 8.17 Naměřené hodnoty pevností v tahu a tvrdosti dle Brinella

Označení tyček		F (AlSi10Mg)		G (AlSi10Mg)		H (AlSi10Mg)		I (AlSi10Mg)	
Pevnost v tahu [MPa]	Tvrdost dle Brinella HB	175	56,2	166	58,3	185	56,5	172	57,2
		166	58,1	175	65,2	179	57,2	172	55,3
		166	62,3	172	61,3	179	61,8	176	60,4
		166	53,8	172	58,8	175	62,5	175	56,3
Aritmetický průměr		168,25	57,6	171,25	60,9	179, 5	59,5	173,75	57,3



Obr. 8.20 Závislosti naměřených hodnot: a) rostoucí obsah Mn v jednotlivých tavebách; b) klesající Dichte index se stoupajícím obsahem Mn; c) rostoucí pevnost v tahu se stoupajícím obsahem Mn; d) rostoucí hodnoty tvrdosti se stoupajícím obsahem Mn

V následujícím grafu (obr. 8.21) je viditelný nárůst poměru obsahu Mn/Fe u jednotlivých taveb, což bylo cílem této taveby. Nejvýhodnější poměr Mn/Fe je dle [2] 0,5, což bylo ve všech čtyřech případech překročeno, lze tedy očekávat malý podíl  $\beta$  ( $Al_5FeSi$ ) fází ve struktuře.



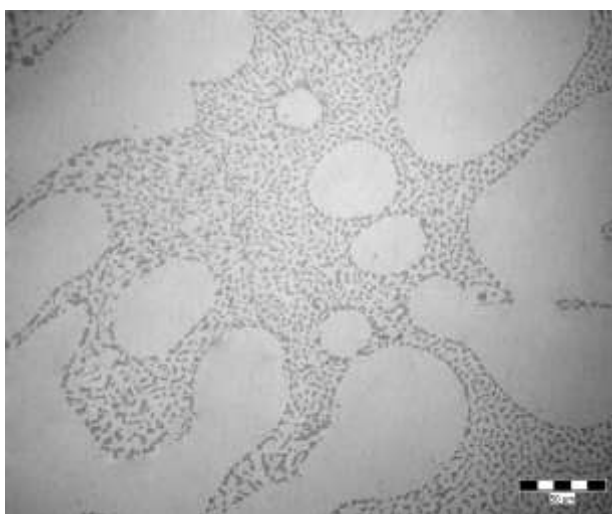
Obr. 8.21 Znázorněný nárůst poměru Mn/Fe u jednotlivých taveb

## 8.9 Vyhodnocení metalografické struktury tavby F, G, H

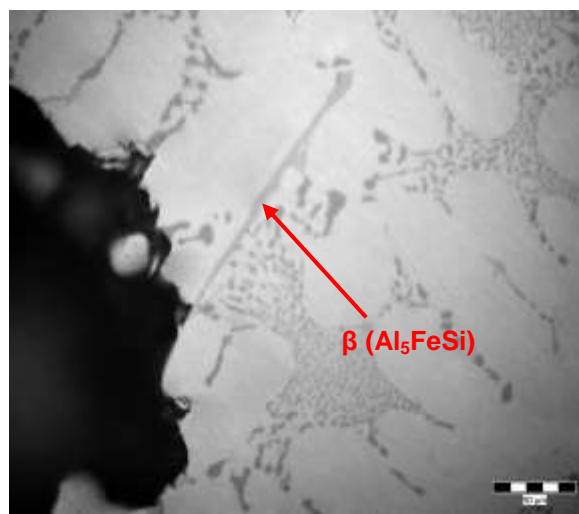
Na vzorcích F a H je rozsáhlá porezita, pouze na vzorku G lze pozorovat porezitu méně rozsáhlou.

### 8.9.1 Vzorek F

Na vzorku F se v malé míře oproti vzorku D z předchozí kapitoly vyskytují nežádoucí  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze (obr. 8.23), což je pravděpodobně způsobeno menším množstvím Fe z chemické analýzy (tab. 8.16). Dále na vzorku nebyly nalezeny téměř žádné  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe, Mn})_3\text{Si}_2$ ) fáze.



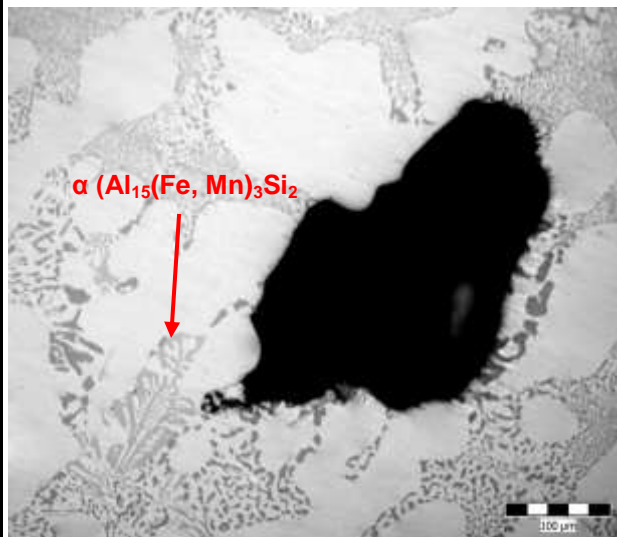
Obr. 8.22 Dokonale modifikovaná struktura vzorku F, slitina  $\text{AlSi10Mg}$ , zv. 400x



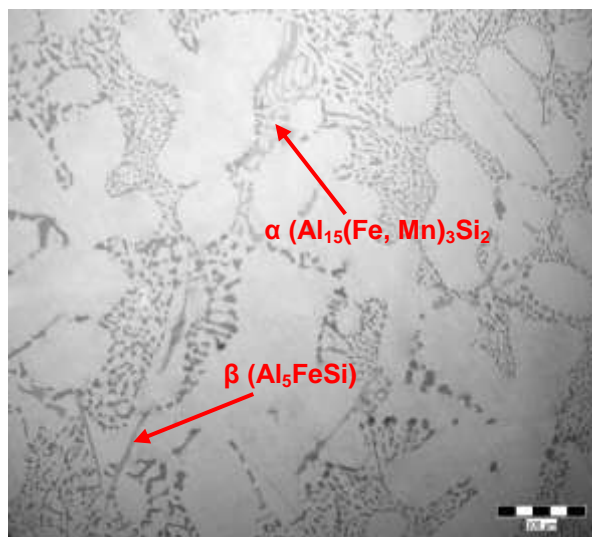
Obr. 8.23 Výskyt  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze v blízkosti póru, slitina  $\text{AlSi10Mg}$ , zv. 400 x

### 8.9.3 Vzorek G

Vzorek G vykazuje menší množství porezity než je na vzorcích F a H. Vyskytují se zde jak  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze, tak také  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe, Mn})_3\text{Si}_2$ ) fáze v celkově podobném poměru.



Obr. 8.24 Výskyt  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe, Mn})_3\text{Si}_2$ ) fáze v blízkosti porezity, zv. 200 x

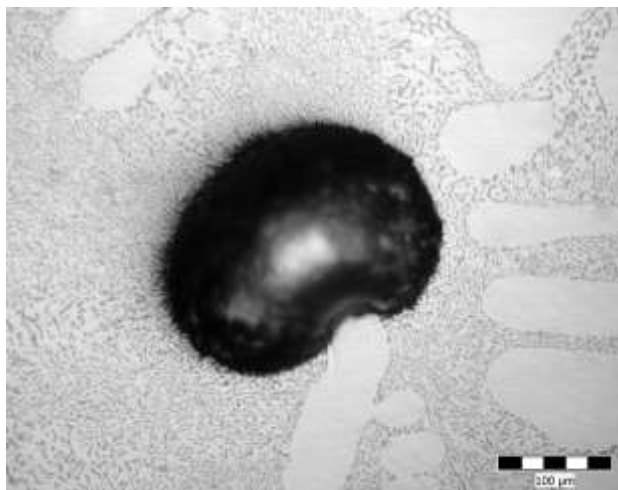


Obr. 8.25 Snímek s výskytem  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe, Mn})_3\text{Si}_2$ ) fáze i  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze, zv. 200 x

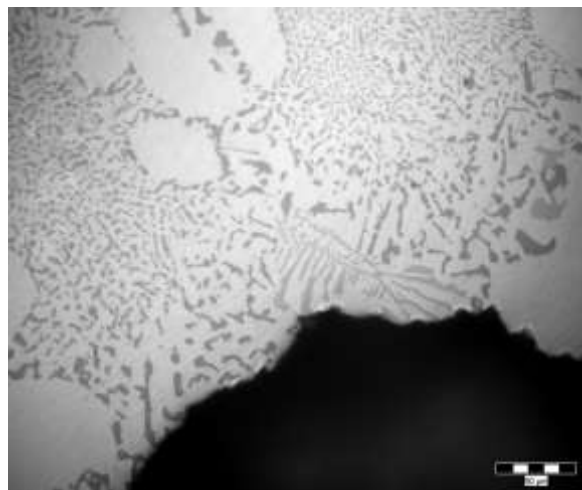


#### 8.9.4 Vzorek H

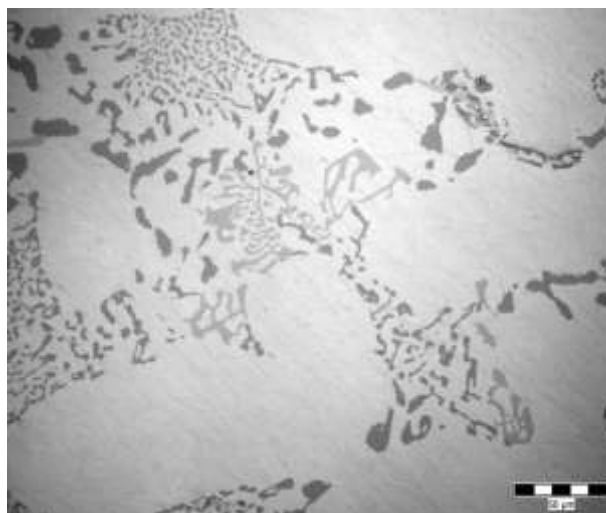
U vzorku H se vyskytuje množství porezity spíše původu plynové dutiny (obr. 8.26). Nežádoucí  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze se v pozorované struktuře téměř nevyskytují, zatímco výskyt  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe, Mn})_3\text{Si}_2$ ) fáze je výrazný (viz obr. 8.27 a obr. 8.28).



Obr. 8.26 Plynová dutina, zv. 200 x



Obr. 8.27  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe, Mn})_3\text{Si}_2$ ) fáze v okolí porezity, zv. 400 x



Obr. 8.28 Rozsáhlá  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe, Mn})_3\text{Si}_2$ ) fáze, zv. 400 x



## 8.10 Shrnutí kapitoly 8

### 8.10.1 Tavby A, B, C

U taveb A, B, C (slitina  $\text{AlSi8Cu3}$ ) je možné pozorovat výrazné změny ve struktuře vznikem rozsáhlých  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ ) fází viditelných na obr. 8.12 a obr. 8.13. V případě tavby B bylo dosaženo poměru  $\text{Mn/Fe}$  ( $\sim 0,39$ ) a na vzorku nebyla pozorována porezita vznikající vlivem  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází, avšak podíl porezity vlivem jiných mechanismů neklesla. Lze tedy říci že porezita ve slitinách Al – Si má souvislost také s poměrem obsahu  $\text{Mn/Fe}$ .

### 8.10.2 Tavby D, E

Tavba D ( $\text{AlSi10Mg}$ ) vykazovala přítomnost rozsáhlých  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází v celém průřezu vzorku (obr. 8.17). Byla nalezena i typická porezita vzniklá zapříčiněním přísunu taveniny vlivem  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází viz obr. 8.16. Přidáním předslitiny  $\text{AlSiMn20}$  do taveniny nedošlo k odstranění  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází, ale bylo prokázáno, že u tavby E zvýšením obsahu Mn došlo ke zmenšení rozsahu těchto fází viz obr. 8.18.

### 8.10.3 Tavby F, G, H

Poslední tavby F, G, H ( $\text{AlSi10Mg}$ ) nevykazovaly oproti tavně D a E na začátku tavení tak rozsáhlý výskyt  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází, což vychází z nižšího obsahu Fe ( $\sim 0,32\%$ ) než bylo v předchozím případě (Fe  $\sim 0,45\%$ ). Poměr  $\text{Mn/Fe}$  v tomto případě byl již od začátku tavení dostačující (0,76), proto bylo předpokládáno, že výskyt porezity vznikající vlivem  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází v tomto případě nebude přítomný. Což bylo metalografickým hodnocením potvrzeno. Dalším přidáváním předslitiny do taveniny poměr  $\text{Mn/Fe}$  vzrůstal a ve struktuře vznikalo větší množství příznivějších  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ ) fází (viz obr. 8.24, obr. 8.27 a obr. 8.28). Porezita byla přítomná ve všech tavnách, avšak ve větším množství se jednalo spíše o porezitu plynovou než mezidendritickou.

Touto kapitolou bylo prokázáno, že poměr obsahů  $\text{Mn/Fe}$  má nemalý vliv na vznikající porezitu. Proto je důležité i z tohoto pohledu neustále dodržovat dostatečný obsah Mn, což by mělo být alespoň  $\frac{1}{2}$  obsahu Fe.

## 9 REALIZACE DOPORUČENÝCH OPATŘENÍ VE SPOLEČNOSTI

V kapitole č. 6 bylo doporučeno několik kroků, které by bylo vhodné splnit ke snížení výskytu vnitřních vad. Jedním z těchto kroků je pravidelná kontrola naplynění vhodným zařízením k tomu určenému. A dále pořízení vhodného zařízení (FDU) k dokonalejšímu odplynování taveniny. Pro přiblížení finančního zásahu těchto zařízení byly v následujícím textu provedeny výpočty návratnosti investice

### 9.1 Nákup zařízení pro měření indexu hustoty

Vzhledem k doporučení a dočasnému zdlouhavému a nepřesnému hodnocení naplynění taveniny (obr. 9.1) na pracovišti neželezných kovů viz str. 49 byl vedením společnosti odsouhlasen nákup nového zařízení na měření indexu hustoty 3 – VT – LC s vahami MK 2200 – LC viz obr. 9.1 od společnosti Šebesta – služby slévárnám s.r.o.



Obr. 9.1 Zastaralé zařízení pro hodnocení naplynění taveniny



Obr. 9.2 Zakoupené zařízení používané pro hodnocení „DICHTE INDEXU“ (3-VT-LC + MK2200-LC)

#### 9.1.1 Výpočet návratnosti investice

Návratnost (v letech, měsících atd.) lze vypočítat metodou čisté současné hodnoty ČSHI (v Kč). Jedná se o porovnání rozdílu mezi současnou hodnotou očekávaných příjmů z investice (SHCF) a náklady na investici ( $N_i$ ). Tato metoda vychází z principu, že hodnota dnešní Kč je větší než hodnota 1 Kč v budoucnosti. Čistou současnou hodnotu lze vypočítat podle vztahu (9.1). [14]

$$\text{ČSHI} = \text{SHCF} - N_i = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} - N_i \quad (9.1)$$



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Kde:

$i$ .....diskontní míra

$CF_t$ ...peněžní tok (cash flow) v období  $t$

$n$ .....počet měsíců (let)

$N_i$ ...počáteční investice (pořizovací náklady) na nakupované zařízení

Diskontní míra je srovnávací číslo udávané v procentech, užívané v metodě čisté současné hodnoty, k hodnocení efektivity investic. Určit by ji měl investor sám podle své schopnosti zhodnocovat prostředky, Při obdobné míře rizika. Rozdílá se u soukromé osoby, občana a jeho rodinného domku, u státní instituce, a rozdílá se u obchodní nebo výrobní firmy, kde se dá předpokládat, že bude výrazně vyšší. [15]

Stávající měřidlo je již odepsané, má tedy nulovou účetní hodnotu.

### Vstupní údaje:

Počáteční investice pořízeného zařízení je

$N_i = 142000 \text{ Kč}$

Zvolená diskontní sazba je

$i = 5 \%$ .

### Úspory z osobních nákladů:

Při vyhodnocování stupně naplynění současným způsobem je nutné udělat několik po sobě jdoucích úkonů: odlití dvou vzorků, uložení jednoho vzorku do evakuovaného prostoru, odsátí vzduchu a vyčkání do konce tuhnutí vzorků. Následuje fáze zpracování vzorku: přenesení do laboratoře, rozříznutí, vybroušení obou řezů a konečné vyhodnocení makrostruktury – počet pórů na  $1 \text{ cm}^2$ , tvar ztuhlé hladiny vzorku. Tyto úkony trvají dohromady cca 50 minut. Zatímco novým způsobem je vzorek zpracován dvojím vážením na vzduchu a pod vodou (display ukáže již objektivní hodnotu indexu hustoty vzorku). Tato činnost trvá cca 5 minut.

Úspora času na zpracování vzorků je 45 minut. Z průměrné čisté mzdy obsluhujícího pracovníka (metalurg nebo mistr tavičny), z odvodů (sociální a zdravotní = 11%) a daně ze mzdy (34%) vychází úspora z osobních nákladů  $U_{os} = 150 \text{ Kč/vzorek}$ . V ušetřeném čase se pracovníci mohou věnovat dalším činnostem, vedoucím ke zlepšení procesů ve slévárně.

### Úspory z energetických nákladů:

Při přípravě vzorku je k vyhodnocení makrostruktury použita strojní pila o příkonu  $p_p = 2,2 \text{ kW}$ , doba řezání je cca  $\tau_r = 1 \text{ min}$ . Průměrná sazba elektrické energie ve společnosti je  $E_s = 3,35 \text{ Kč/kWh}$ . Dle vztahu (9.2) vypočteme úsporu  $U_1$ :

$$U_1 = E_s \cdot p_p \cdot \tau_r = \frac{3,35 \text{ Kč} / \text{kWh}}{60 \text{ min}} \cdot 2,2 \text{ kW} \cdot 1 \text{ min} = 0,12 \text{ Kč} / \text{vzorek} \quad (9.2)$$

Vyřazením řezáním vzorků vychází úspora:  $U_1 = 0,12 \text{ Kč/vzorek}$ .

Příkon stávajícího zařízení je  $p_{z1} = 800 \text{ W}$ , doba činnosti přístroje při jednom měření  $\tau_1 = 30 \text{ s}$ . Dle vztahu (9.3) vypočteme ztrátu energie  $Z_1$ :



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

$$Z_1 = E_s \cdot p_{z1} \cdot \tau_1 = \frac{3,35 \text{ Kč} / \text{kWh}}{3600 \text{ s}} \cdot 0,8 \text{ kW} \cdot 30 \text{ s} = 0,02 \text{ Kč} / \text{vzorek} \quad (9.3)$$

Použitím stávajícího zařízení dochází ke ztrátě el. energie:  $Z_1 = 0,02 \text{ Kč/vzorek}$ .

Příkon nového zařízení je  $p_{z2} = 350 \text{ W}$ , doba činnosti přístroje při jednom měření  $\tau_2 = 20 \text{ s}$ . Dle vztahu (9.4) vypočteme ztrátu energie  $Z_2$ :

$$Z_2 = E_s \cdot p_{z2} \cdot \tau_2 = \frac{3,35 \text{ Kč} / \text{kWh}}{3600 \text{ s}} \cdot 0,35 \text{ kW} \cdot 20 \text{ s} = 0,01 \text{ Kč} / \text{vzorek} \quad (9.4)$$

Použitím nového zařízení dochází ke ztrátě el. energie:  $Z_2 = 0,01 \text{ Kč/vzorek}$ .

Použitím nového zařízení dochází k menším ztrátám el. energie, čímž lze říci, že zahrnutím spotřeby el. energie při vakuování vychází úspora  $U_2$ :

$$U_2 = Z_1 - Z_2 = 0,02 - 0,01 = 0,01 \text{ Kč/vzorek}.$$

Celková úspora osobních nákladů a energií  $U_c$  je tedy:

$$U_c = U_{os} + U_1 + U_2 = 150 + 0,12 + 0,01 = 150,13 \text{ Kč/vzorek} \quad (9.5)$$

### Úspora z neshodné produkce

Za rok 2009 byla zjištěna z dokumentace společnosti celková neshodná produkce ve slévárně neželezných kovů u odlitků ze slitin Al v hodnotě  $2\,205\,951 \text{ Kč/rok}$ , z čehož neshodná produkce týkající se vnitřních vad byla v hodnotě  $506\,272 \text{ Kč/rok}$ . Použitím objektivnějšího měření naplynělosti taveniny je možné dosáhnout velmi kvalitního posouzení a následného dodatečného odplynění taveniny. Odborným odhadem pracovníků dodavatele zařízení a ze zkušenosti pracovníků slévárny by úspora neshodné produkce dosáhla minimálně 5% z korunového vyjádření vnitřních vad v roce 2009, což je  $25313,6 \text{ Kč/rok}$ , přičemž měsíční úspora vychází cca  $U_m = 2000 \text{ Kč/měs}$ .

### Celková úspora

Při průměrném počtu  $12 \text{ vzorků}$  za směnu a počtu pracovních dnů v měsíci  $Dm = 20,4 \text{ dnů}$  vychází úspora po zaokrouhlení (9.6):

$$U = U_c \cdot 12 \cdot Dm = 150,13 \text{ Kč/vzorek} \cdot 12 \cdot 20,4 \approx \underline{35000 \text{ Kč/mes}} \quad (9.6)$$

Celková měsíční úspora sečtením dílčích úspor vychází:

$$CF = U + U_m = 2000 + 35000 = \underline{\underline{37000 \text{ Kč} / \text{mes}}} \quad (9.7)$$



### Návratnost investice:

Pro měsíční úsporu dostáváme po dosazení do vztahu (9.1):

$$\dot{C}SHI = \frac{37000}{(1+0,05)^1} + \frac{37000}{(1+0,05)^2} + \frac{37000}{(1+0,05)^3} + \frac{37000}{(1+0,05)^4} + \frac{37000}{(1+0,05)^5} - 142000 \cong 18000 \text{ Kč}$$

Počáteční investice s vypočteným zůstatkem cca 18000 Kč by byla návratná za **5 měsíců a několik dní** (necelých 6 měsíců), což je považováno za vyhovující návratnost a nákup zařízení lze doporučit.

## 9.2 Situace po realizaci zařízení 3-VT-LC + MK2200-LC

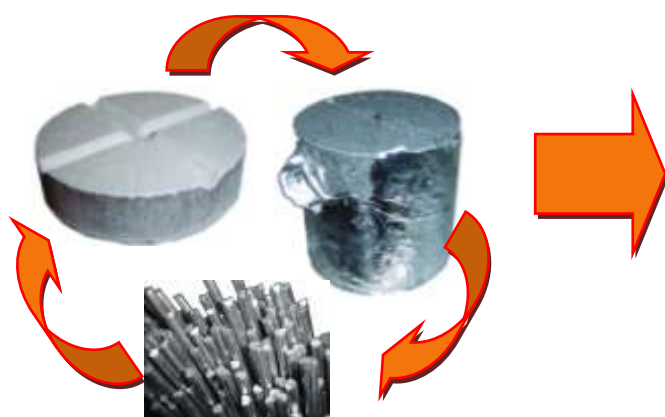
Nákup doporučeného zařízení na stanovení Dichte indexu (3-VT-LC + MK2200-LC) byl realizován v únoru 2010, a lze říci, že na pracovišti neželezných kovů je opravdu pravidelně využíváno. Dichte index je kontrolován a zapisován vždy před odpichem, přičemž se jeho hodnoty pohybují neustále okolo 5 % – 7 %, což je považováno za nevhodné, proto by bylo vhodné dokonalejší odplyňování taveniny např. pomocí zařízení FDU (Foundry Degassing Unit).



### 9.3 Nákup zařízení FDU pro odplynění a úpravu taveniny

Vzhledem k neustále vyskytující se porezitě odlitků je nutné průběžně zlepšovat proces úpravy taveniny. Koupí zařízení FDU Mark 2 x 10 MTS 1500 (obr. 9.4) od společnosti Foseco se nahradí stávající způsob odplyňování, modifikace a další úpravy taveniny prováděné ponořením tablet viz obr. 9.3 děrovaným zvonek na dno kelímku.

Zařízení FDU umožňuje také automatické dávkování granulí modifikačního prostředku a elektronické řízení procesu s výstupem do počítačové sítě.



Obr. 9.3 Stávající používané materiály na úpravu taveniny



Obr. 9.4 Nové zařízení FDU Mark 10 2 x MTS 1500 [16]

#### 9.3.1 Popis produktu

MTS 1500 je stanice založena na technologii rotačního odplyňování s možností injektáže celé řady aditiv pro úpravu tekutého kovu. Přidávání těchto aditiv pro úpravu taveniny využívá unikátní metody, kdy jsou vytavující soli dávkovány dispenzorem do víru, záměrně vytvořeného otáčením rotoru. Tento vír je pečlivě řízen tak, aby prováděl účinné mísení přípravku s taveninou. [16]

Na obr. 9.5 je naznačen standardní cyklus úpravy s využitím jednotky MTS 1500, který se skládá z řady fází, které lze sumarizovat následujícím způsobem: [16]

#### 1. Zavedení

##### **hřídele a rotoru**

Hřídel a rotor se nejprve spustí do taveniny.



#### 2. Vytvoření víru

Rychlost rotoru se zvyšuje až do bodu, kdy se okolo hřídele vytvoří vír.



#### 4. Zastavení víru a odplynění

Po ukončení dávky se do taveniny spustí vlnolam, vír se zastaví a začne fáze odplynění.



#### 3. Přidávání metalurgických činidel

Přímo do víru se následně rozptýlí požadované množství soli, která je vtažena vírem dolů do taveniny.



Obr. 9.5 Standardní cyklus úpravy taveniny s využitím jednotky MTS 1500 [16]

### 9.3.2 Výpočet návratnosti investice

Při výpočtu návratnosti postupujeme analogicky dle vztahu (9.1):

Počáteční investice pořízeného zařízení je  
Zvolená diskontní sazba je

$$N_i = 802802 \text{ Kč}$$

$$i = 5 \text{ \%}$$

#### Úspory z osobních nákladů:

Při zpracování taveniny v šestisetkilovém kelímku tavící pece současným způsobem je třikrát po sobě provedeno ponoření dvou ks tablet děrovaným zvonek. Tato činnost trvá průměrně 12 minut. Následuje modifikace stejným způsobem, ale s pěti tabletami cca 8 minut. Zatímco novým způsobem předpokládáme dobu odplynění s následnou modifikací vyspáním elektronicky řízené dávky granulí do kelímku cca 5 minut (bude zpřesněno po odzkoušení a změřeno pro řídicí systém).

Úspora času použitím zařízení FDU je tedy cca 15 minut. Z průměrné čisté mzdy obsluhujícího pracovníka (metalurg nebo mistr tavírný), z odvodů (sociální a zdravotní - 11%) a daně ze mzdy (34%) vychází úspora z osobních nákladů cca  $U_{os} = 38 \text{ Kč/tavbu}$ . V ušetřeném čase se pracovníci mohou věnovat dalším činnostem, vedoucím ke zlepšení procesů ve slévárně.



### Úspory z materiálových nákladů:

#### Při odplynění:

Při stávajícím způsobu odplynění je spotřeba odplyňovacích tablet ECOSAL 320  $S_1 = 1,2 \text{ kg/tavbu}$ , při ceně  $H_1 = 55,60 \text{ Kč/kg}$  vychází cena spotřebovaných tablet (9.8):

$$U_{o1} = S_1 \cdot H_1 = 1,2 \text{ kg / tavbu} \cdot 55,60 \text{ Kč / kg} = 66,72 \text{ Kč / tavbu} \quad (9.8)$$

Při novém způsobu úpravy taveniny předpokládáme spotřebu dusíku  $75 \text{ dm}^3/\text{tavbu}$ . Při průměrné ceně dusíku ve velkých lahvích ( $10 \text{ m}^3$ ) vychází  $3500 \text{ Kč/láhev}$ , při přepočtu spotřeby dusíku na 1 tavbu dle (9.9) vychází:

$$U_{o2} = S_2 \cdot H_2 = 75 \text{ dm}^3 / \text{tavbu} \cdot \frac{3500 \text{ Kč / lahev}}{10000 \text{ dm}^3} = 26,25 \text{ Kč / tavbu} \quad (9.9)$$

Úspora materiálu při odplynění  $U_o$  je dle (9.10):

$$U_o = U_{o1} - U_{o2} = 66,72 \text{ Kč / tavbu} - 26,25 \text{ Kč / tavbu} \cong 40 \text{ Kč / tavbu} \quad (9.10)$$

#### Při modifikaci:

Modifikace je prováděna použitím tablet SIMODAL 97, spotřeba je  $1,0 \text{ kg/tavbu}$  při ceně  $97,11 \text{ Kč/kg}$  je cena spotřebovaných tablet  $U_{m1} = 97,11 \text{ Kč/tavbu}$  (využití 40%).

Modifikace zařízením FDU je prováděna použitím granulátu COVERAL MTS 1572, spotřeba je  $\sim 0,5 \text{ kg/tavbu}$  a to je  $U_{m2} = 46,60 \text{ Kč/tavbu}$  (využití 80%).

Celková úspora modifikátoru dle (9.11) je:

$$U_o = U_{m1} - U_{m2} = 97,11 \text{ Kč / tavbu} - 46,60 \text{ Kč / tavbu} \cong 50 \text{ Kč / tavbu} \quad (9.11)$$

Za předpokladu, že ostatní prostředky na ošetření taveniny budou mít přibližně stejnou spotřebu při stávajícím i novém postupu je celková úspora materiálů při úpravě taveniny dle (9.12)  $U_c$ :

$$U_c = U_o + U_m = 40 \text{ Kč / tavbu} + 50 \text{ Kč / tavbu} = 90 \text{ Kč / tavbu} \quad (9.12)$$

### Úspory (ztráty) z energetických nákladů:

Při stávajícím způsobu odplynění je spotřeba energie  $U_{en}$  dle (9.13) na vysušení tablet elektrickou vyhřívací deskou (temperování na teplotu  $45$  až  $50^\circ\text{C}$ ) při příkonu desky  $p_d = 500 \text{ W}$  a času chodu  $\tau_{ch} = 8 \text{ hodin}$ .

$$U_{en/8hod} = E_s \cdot p_d \cdot \tau_{ch} = 3,35 \text{ Kč / kWh} \cdot 0,5 \text{ kW} \cdot 8 \text{ hod} \cong 13,50 \text{ Kč / 8hod} \quad (9.13)$$

$$U_{en} = \frac{U_{en/8hod}}{12} \cong 1,13 \text{ Kč / tavbu}$$



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Při použití odplynovacího zařízení FDU s příkonem cca  $p_{FDU} = 2,5 \text{ kW}$  a době chodu  $\tau_{FDU} = 5 \text{ minut}$  vychází spotřeba el. energie dle (9.14):

$$U_{FDU} = E_s \cdot p_{FDU} \cdot \tau_{FDU} = \frac{3,35 \text{ Kč} / \text{kWh}}{60 \text{ min}} \cdot 2,5 \text{ kW} \cdot 5 \text{ min} \cong 0,6 \text{ Kč} / \text{tavbu} \quad (9.14)$$

Celková úspora energetických nákladů je tedy dle (9.15):

$$U_E = U_{en} - U_{FDU} = 1,13 \text{ Kč} / \text{tavbu} - 0,6 \text{ Kč} / \text{tavbu} \cong 0,50 \text{ Kč} / \text{tavbu}$$

### Úspora z neshodné produkce

Za rok 2009 byla zjištěna z dokumentace společnosti celková neshodná produkce ve slévárně neželezných kovů u odlitků ze slitin Al v hodnotě  $2\,205\,951 \text{ Kč/rok}$ , z čehož neshodná produkce týkající se vnitřních vad byla v hodnotě  $506\,272 \text{ Kč/rok}$ . Použitím kvalitního odplynění taveniny je možné dosáhnout velmi kvalitních výsledků. Odborným odhadem pracovníků dodavatele zařízení a ze zkušenosti pracovníků slévárny by úspora neshodné produkce dosáhla minimálně 40% z korunového vyjádření vnitřních vad v roce 2009, což je  $202\,508,80 \text{ Kč/rok}$ , přičemž měsíční úspora vychází cca  $U_m = 17\,000 \text{ Kč/měs.}$

### Úspory celkem:

Celkové osobní, materiálové a energetické úspory dle (9.15) jsou:

$$\begin{aligned} U_{OME} &= U_{os} + U_c + U_E = \\ &= 38 \text{ Kč} / \text{tavbu} + 90 \text{ Kč} / \text{tavbu} + 0,50 \text{ Kč} / \text{tavbu} = 128,50 \text{ Kč} / \text{tavbu} \end{aligned} \quad (9.15)$$

Měsíční úspora:

$$U_{Me} = U_{OME} \cdot 12 \cdot 20,4 = 144,90 \text{ Kč} / \text{tavbu} \cdot 12 \cdot 20,4 \cong \underline{\underline{32\,000 \text{ Kč} / \text{mes}}} \quad (9.16)$$

Celková roční úspora CF včetně úspor z neshodné produkce dle (9.17):

$$\begin{aligned} CF &= U_{Me} + U_m = 32\,000 \text{ Kč} / \text{mes} + 17\,000 \text{ Kč} / \text{mes} = \\ &= 49\,000 \text{ Kč} / \text{měs} = 588\,000 \text{ Kč} / \text{rok} \end{aligned} \quad (9.17)$$

### Návratnost investice:

Dle vztahu (9.1) vypočteme čistou současnou hodnotu:

$$\begin{aligned} \text{ČSHI} &= \frac{588\,000}{(1+0,05)^1} + \frac{588\,000}{(1+0,05)^2} - 802\,802 \cong 290\,000 \text{ Kč} \\ \text{ČSHI} &= \frac{49\,000}{(1+0,05)^1} + \frac{49\,000}{(1+0,05)^2} + \frac{49\,000}{(1+0,05)^3} + \frac{49\,000}{(1+0,05)^4} + \frac{49\,000}{(1+0,05)^5} + \\ &+ \frac{49\,000}{(1+0,05)^6} + \frac{49\,000}{(1+0,05)^7} + \frac{49\,000}{(1+0,05)^8} - 290\,000 = \text{cca } 27\,000 \text{ Kč} \end{aligned}$$

Počáteční investice s vypočteným zůstatkem  $27\,000 \text{ Kč}$  by byla návratná cca za **2 roky a 8 měsíců**, což lze vzhledem k možnému snížení porezity a zvýšení jakosti produktů považovat za vhodnou investici.

## 9.4 Situace po realizaci zařízení FDU Mark 10 2 x MTS 1500

V květnu 2010 bylo objednané FDU Mark 10 2 x MTS 1500 ve slévárně neželezných kovů nainstalováno za přítomnosti odborníků (obr. 9.6 a obr. 9.7) a odzkoušeno. Pro dávkování modifikátoru a očkovačla se používá granulát COVERAL MTS 1572 a COVERAL MTS 1584 z násypky šnekovým dopravníkem.



Obr. 9.6 Instalace pojízdného FDU Mark 10 2 x MTS 1500

Po instalaci nového zařízení FDU byly uskutečněny první zkušební tavyby v pecích č. 4, 6 a 7. Odplyňování s řízeným přívodem modifikačních a očkovačích přísad do taveniny trvalo vždy cca 6 minut a poté byly odebrány vzorky pro stanovení Dichte indexu. První výsledky viz tab. 9.1 ukázaly, že nové zařízení skutečně dokáže značně snížit naplynění taveniny oproti dosavadnímu způsobu odplyňování ponorným zvonem. Bohužel již nebylo možné uskutečnit metalografické výbrusy pro zhodnocení struktury a přítomnosti porezity, ale i přesto lze očekávat minimální porezitu ve struktuře. Výsledky taveb s naměřenými hodnotami Dichte indexu a pevnosti v tahu jsou uvedeny v tab. 9.1.



Obr. 9.7 Grafitový rotor a hradidlo

Tab. 9.1 Výsledky prvních taveb s použitím FDU

Číslo pece	Materiál	Teplota taveniny při chodu FDU [°C]	Dichte index [%]	Pevnost v tahu [MPa]
4 (600 kg)	AlSi8Cu3	710	1,12	169,172
4 (600 kg)	AlSi8Cu3	725	0,38	185,166
6 (750 kg)	AlSi10Mg	720	2,2	169,162
6 (750 kg)	AlSi10Mg	730	0,38	168,172
7 (750 kg)	AlSi10Mg	720	1,51	156,156





## 10 ZÁVĚR

Pro snížení neshodné produkce odlitků ze slitin hliníku ve společnosti Slévárna a modelárna Nové Ransko, s.r.o. bylo vybráno 6 problémových odlitků, které neodpovídaly požadavkům náročného zahraničního zákazníka. Z těchto odlitků byly odebrány vzorky a podrobeny metalografickému zkoumání, při kterém bylo zjištěno, že největším problémem je výskyt rozsáhlé porezity (kombinace mikrostaženiny a plynové dutiny) v celém průřezu odlitku. Některé snímky struktury dokonce prokázaly porezitu vzniklou vlivem  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází, přičemž bylo zjištěno, že výskyt těchto fází je u všech vzorků značný. U vzorku č. 1 byla dále zjištěna přemodifikovaná struktura a u vzorku č. 2 dokonce struktura nemodifikovaná způsobena pravděpodobně odezněním modifikačního účinku. Vyskytující se fáze byly analýzou ověřeny elektronovým rastrovacím mikroskopem.

Aby byla nalezena možná řešení pro odstranění těchto vad, byl nutný detailní rozbor celého postupu výroby odlitků, přičemž bylo zjištěno několik zásadních kroků, vhodných pro zlepšování, a to:

- snížit časté přehřívání taveniny
- věnovat více pozornosti při dávkování modifikačních přípravků s ohledem na odeznívací účinek modifikátoru
- nahrazení stávajícího způsobu odplynování vhodnějším zařízením např. FDU
- zavedení pravidelné kontroly naplynění nákupem nového zařízení
- při chemické analýze věnovat více pozornosti poměru Mn/Fe

V literatuře [11], [12] a [13] byl sledován vliv Fe a Mn na vznik nepříznivých  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází, které mohou způsobovat i vznik porezity, což bylo prokázáno na vzorcích č. 1, 2, 3 a 4 metalografickým hodnocením (viz obr. 3.8, obr. 3.10, obr. 3.17 a obr. 3.19). V provozních podmínkách společnosti bylo provedeno několik experimentů s metalografickým sledováním strukturní změny  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fáze na kompaktnější  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ ) fázi postupným přidáváním předslitiny AlMn20 do pece. Bylo prokázáno, že při velmi nízkém poměru Mn/Fe a obsahu Fe nad cca 0,4 % se ve struktuře objevuje rozsáhlý výskyt  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ) fází. Jeli poměr Mn/Fe blízký hodnotě  $\frac{1}{2}$  dle [2] jsou tyto fáze nahrazeny příznivějšími  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ ) fázemi, a pokud dojde k překročení poměru Mn/Fe nad hodnotu 1 jsou ve struktuře patrné velmi rozsáhlé  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ ) fáze. Při každé tavbě byly odlity zkušební tyčky a následně provedeny zkoušky pevnosti a tvrdost dle Brinella. Z výsledků lze konstatovat, že se stoupajícím obsahem Mn pevnost v tahu stoupá, zatímco tvrdost je kolísavá. Tímto experimentem bylo dokázáno, že je důležité udržovat hodnotu poměru obsahů Mn/Fe na hodnotě cca  $\frac{1}{2}$ .

Na konci diplomové práce (kapitola č. 9) jsou vypočítány návratnosti investic do doporučených zařízení s tím, že investice do zařízení pro stanovení Dichte indexu je návratná za cca 5 měsíců a do zařízení FDU za necelé 3 roky, čímž byla koupě těchto zařízení doporučena a následně po několika měsících uskutečněna. Sledováním procesu lze potvrdit, že zařízení pro stanovení indexu hustoty je pravidelně využíváno. Na konci měsíce května 2010 bylo do společnosti nainstalováno nově zakoupené zařízení FDU s dávkováním modifikačních a očkovacích přísad. První provedené tavby ukázaly, že hodnoty naplynění taveniny klesly cca pod 2 %, čímž je splněn požadavek zákazníka, a v odlitcích lze očekávat minimální porezitu v důsledku naplynění. Bohužel, vzhledem k pozdnímu termínu instalace zařízení již nebylo možné provést snímky metalografické struktury, čímž by se předpoklad minimálního výskytu porezity prokázal.

Závěrem lze konstatovat, že cíle diplomové práce byly splněny, a navržená opatření byla ověřena uspokojivými výsledky uvedenými v závěru této práce.





## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY

- [1] ELBEL, Tomáš. Identifikace vad odlitků a příčin jejich vzniku. In česká slévárenská společnost. *Slévárenská ročenka 2001*. Brno, 2001. s. 139 - 146. ISBN 80-238-6529-3, ISSN 0231-7087.
- [2] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [3] MICHNA, S., aj. *Encyklopedie hliníku*, I. vyd. Děčín: ALCAN, 2005. 699 s. ISBN 80-89041-88-4.
- [4] BOLIBRUCHOVÁ, Dana, TILLOVÁ, Eva.: *Zlievarenské zliatiny Al-Si*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2005. 180 s. ISBN 80-8070-485-6.
- [5] CELKO, Ladislav, et al. *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. FSI VUT v Brně : c2010 [cit. 2010-04-28]. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/atlas/stahnout.php>>.
- [6] PROTIVÍNSKÝ. *BL – aktivovaný* [online]. 6. 4. 2009 [cit. 2010-02-23]. Dostupné z: <[http://www.keramost.cz/gfx/download/listy/bl\\_b\\_aktivovany.pdf](http://www.keramost.cz/gfx/download/listy/bl_b_aktivovany.pdf)>.
- [7] JARÁČ. *SKLÁŘSKÉ PÍSKY TAVNÉ - výpis z podnikové normy PN-01-1998* [online]. 20. 1. 2010 [cit. 2010-02-08]. Dostupné z WWW: <<http://www.sklopisek.cz/files/pdf/sl%C3%A9vp%C3%ADsky.pdf>>.
- [8] RUSÍN, Karel. *Disperzní formovací materiály : Návod do cvičení*. Praha : SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1987. 104 s. 05-013-87.
- [9] PTÁČEK, Jiří. Zkušenosti se zjišťováním obsahu plynů v tavenině. In Česká slévárenská společnost. 3. *Holečkova konference : Redukce nákladů v období ekonomické a finanční krize, technologie, metalurgie, metalurgická kvalita a metalografie slitin neželezných kovů*. [s.l.] : [s.n.], 11. 5. 2009 [cit. 2010-04-28]. Dostupné z WWW: <[http://www.rgu.cz/index.php?option=com\\_content&-view=article&id=74:die-rgu-unterstuetzt-die-ihk-zu-dortmund&catid=1:latest-news](http://www.rgu.cz/index.php?option=com_content&-view=article&id=74:die-rgu-unterstuetzt-die-ihk-zu-dortmund&catid=1:latest-news)>.
- [10] *Cesar.fme.vutbr.cz : Chemické složení Al a slitin Al slévárenských podle EN 1706* [online]. 15. 11. 2001 [cit. 2010-03-28]. Al slitiny slévárenské - EN: Dostupné z WWW: <<http://cesar.fme.vutbr.cz/informace/nezelezo/-Aschen.htm>>.
- [11] SCHNEIDER, Wolfgang, et al. Der Einfluss von Eisen und Mangan auf die Porositätsbildung in AlSi-Gusslegierungen. *Giesserei*. 2008, 9, s. 20 - 29.
- [12] TAYLOR, John A. Effect of Iron in Al-Si Casting Alloys. In . Brisbane, Australia : The University of Queensland, 12.11.2004 [cit. 2010-03-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.aomevents.com/conferences/afi/papers/Taylor.pdf>>.



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

- [13] DINNIS, Cameron; TAYLOR, John; DAHLE, Arne. Porosity formation in Al-Si foundry alloys containing iron and manganese : Porositätsbildung in eisen- und manganhaltigen Al-Si-Gusslegierungen. *Gisserei Forschung*. 2005, 57, 4, s. 2 - 10.
- [14] *Podfuck – Ekonomika podniku* [online]. © 2004-2008 [cit. 2010-04-13]. Dostupné z: < [http://podfuck.net/dokumenty/26/ekonomika\\_podniku/](http://podfuck.net/dokumenty/26/ekonomika_podniku/)>.
- [15] KARÁSEK, Jiří. *Metody vyhodnocení efektivnosti investic – nástroj racionálního rozhodování* [online]. [cit. 2010-03-25]. Dostupné z: <<http://www.setrnebudovy.cz/component/content/article/35>>.
- [16] *MTS 1500: Automatizovaná stanice na úpravu taveniny* [online]. 24. 4. 2006 [cit. 2010-03-27]. Dostupné z: <[http://www.foseco.cz/cz/downloads/Brochures/-MTS\\_1500\\_\\_cz\\_\\_final.pdf](http://www.foseco.cz/cz/downloads/Brochures/-MTS_1500__cz__final.pdf)>.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/ Symbol	Jednotka	Popis
$A_5$	[%]	tažnost
CF	[Kč/měs]	celková měsíční úspora
$CF_t$		peněžní tok v období t
č.		číslo
ČSHI	[Kč]	čistá současná hodnota
$d_{25}, d_{75}$	[%]	pravidelnost zrnitosti ostřiva
$d_{50}$	[mm]	střední průměr zrna
DI	[%]	Dichte index
Dm	[dny]	počet pracovních dnů v měsíci
$E_s$	[Kč/kWh]	sazba za energii
FDU		Foundry Degassing Unit – odplyňovací zařízení
g	[m.s <sup>-2</sup> ]	gravitační konstanta
$\eta$	[kg.s <sup>-1</sup> .m <sup>-1</sup> ]	dynamická viskozita
$H_1$	[Kč/kg]	cena za 1kg tablet
$H_2$	[Kč/láhev]	průměrná cena dusíku
HB	[-]	tvrdost
Hm. %	[%]	hmotnostní procenta
i	[%]	diskontní míra
LKG		litina s kuličkovým grafitem
LLG		litina s lupínkovým grafitem
$MK_{falc}$	[mm]	střední velikost zrn
$m_o$	[g]	hmotnost vysušeného písku po plavení
$m_{RAT}$	[g]	hmotnost vzorku váženého v atmosféře
$m_{RVO}$	[g]	hmotnost vzorku váženého ve vodě
$m_s$	[g]	hmotnost vysušeného písku před plavením
$m_{VAT}$	[g]	hmotnost vzorku váženého v atmosféře
$m_{VVO}$	[g]	hmotnost vzorku váženého ve vodě
n		počet měsíců
n. j. p.		normální jednotky prodyšnosti
$N_i$	[Kč]	počáteční investice
$n_{th}$	[ks.g <sup>-1</sup> ]	teoretický specifický počet zrn
$p_d$	[W]	příkon desky
$p_{FDU}$	[kW]	příkon FDU
pH		kyselost
$p_p$	[kW]	příkon pily
$p_{z1}$	[W]	příkon stávajícího zařízení
$p_{z2}$	[W]	příkon nového zařízení
$\rho$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota kovu
$R_m$	[MPa]	mez pevnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
$\rho_p$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota vzorku ztuhlého za atm. tlaku
$\rho_\sigma$	[g.cm <sup>-3</sup> ]	sytná objemová hmotnost ostřiva
$\rho_\varpi$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota vzorku ztuhlého ve vakuu 80 mbar
$\rho_{cO\Delta\Psi}$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota vody
$S_1$	kg/tavbu]	spotřeba odplyňovacích tablet
$S_2$	[dm <sup>3</sup> /tavbu]	spotřeba dusíku na 1 tavbu
SEM		rastrovací elektronický mikroskop
SHCF	[Kč]	současná hodnota očekávaných příjmů z investice
$S_{th}$	[cm <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> ]	teoretický povrch



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zkratka/ Symbol	Jednotka	Popis
$S_w$	$[\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}]$	specifický měrný povrch
$\tau_1$	[s]	doba činnosti přístroje při jednom měření
$\tau_2$	[s]	doba činnosti přístroje při jednom měření
T6		rozpouštěcí žíhání
T7		vytvrzení a stabilizace
$\tau_f$	[min]	doba chodu FDU
$\tau_{ch}$	[hodiny]	doba chodu vyhřívací desky
$\tau_r$	[min]	doba řezání
U	[Kč/měs]	úspora za měsíc
$U_1$	[Kč/vzorek]	úspora vyřazením řezání vzorků
$U_2$	[Kč/vzorek]	úspora energie použitím nového zařízení
$U_c$	[Kč/vzorek]	celková úspora osobních nákladů a energií
$U_c$	[Kč/tavbu]	celková úspora materiálů při úpravě taveniny
$U_E$	[Kč/tavbu]	celková úspora energetických nákladů FDU
$U_{en}$	[Kč/tavbu]	spotřeba energie stávajícím odplyněním
$U_{en/8\text{hod}}$	[Kč/8 hod]	spotřeba energie stávajícím odplyněním
$U_{FDU}$	[Kč/tavbu]	spotřeba el. energie použitím FDU
$U_m$	[Kč/měs]	měsíční úspora z neshodné produkce
$U_{m1}$	[Kč/tavbu]	cena spotřebovaných tablet při stávajícím způsobem
$U_{m2}$	[Kč/tavbu]	cena spotřebovaného granulátu použitím FDU
$U_{Me}$	[Kč/měs]	měsíční úspora
$U_o$	[Kč/tavbu]	úspora materiálu při odplynění
$U_o$	[Kč/tavbu]	úspora materiálu při modifikaci
$U_{o1}$	[Kč/tavbu]	cena spotřebovaných tablet
$U_{o2}$	[Kč/tavbu]	spotřeba dusíku
$U_{OME}$	[Kč/tavbu]	celkové osobní, materiálové a energetické úspory
$U_{os}$	[Kč/vzorek]	Úspora z osobních nákladů
Z	[%]	kontrakce (zúžení)
$Z_1$	[Kč/vzorek]	ztráta energie použitím stávajícího zařízení
$Z_2$	[Kč/vzorek]	ztráta energie použitím nového zařízení
ZV.		zvětšeno



## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1 Vykreslené histogramy a záznamy chemického složení zjištěné při analýze  
rastrovacím elektronovým mikroskopem
- Příloha č. 2 Hodnoty prodyšnosti formovací směsi jednotlivých odlitků
- Příloha č. 3 Hodnoty pevnosti v tlaku formovací směsi jednotlivých odlitků
- Příloha č. 4 Hodnoty vlhkostí formovací směsi jednotlivých odlitků
- Příloha č. 5 Chemické složení jednotlivých odlitků